

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Měření dynamických hydraulických veličin při hydraulickém
rázu.

Measurement of Dynamic Hydraulic Quantities at Hydraulic
Shock waves.

Student: Jiří Nemrava
Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Milada Kozubková, CSc.

Ostrava 2012

Zadání bakalářské práce

Student: **Jiří Nemrava**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení**
Téma: **Měření dynamických hydraulických veličin při hydraulickém rázu.**
Measurement of Dynamic Hydraulic Quantities at Hydraulic Shockwaves.

Zásady pro vypracování:

1. Zpracování teorie o hydraulickém rázu, definování tlakového spádu, rychlosti zvuku v kapalině.
2. Přehled měřidel dynamického tlaku a průtoku.
3. Popis zařízení pro měření hydraulického rázu.
4. Kalibrace snímačů, programování rozsahu na dynamickém diferenčním tlakoměru.
5. Měření, grafické zpracování výsledků a porovnání výsledků s literaturou.

Seznam doporučené odborné literatury:


DRÁBKOVÁ, SYLVA A KOL. *Mechanika tekutin*. OSTRAVA: VŠB-TU Ostrava, 2007. 248 S. (Elearningová učebnice). ISBN 978-80-248-1508-4.
BOJKO, M. AJ. *Základy hydromechaniky a zásobování hasiv*. Ostrava: VŠB Ostrava 2007. 182 s., ISBN 80-86634-53-1
MILLER, D., S. *Internal Flow System*, BHRA UK, 396 s., ISBN 0-947711-77-5
KOZUBKOVÁ, Milada a kol. *Mechanika tekutin, návody pro laboratorní cvičení*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 113 s. (Elektronická publikace na CD ROM).
KOZUBKOVÁ, M. *Matematické modely kavitace a hydraulického rázu*. Monografie. 130. 1.vydání, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009, 130 stran. ISBN 978-80-248-2043-9.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012


prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.
vedoucí katedry

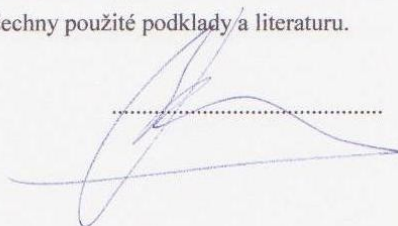



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Mistopřisežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě12.5.2012.....

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized, cursive script, positioned over a dotted line.

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, же Высoкá школа ба́нская – Техни́кая универзи́та Остра́ва (дále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было сjeднáно, же с VŠB-TUO, в пpипаде́ зáйма з její strany, узавpу лицен́ии сmlouvu s oppávněním užít dílo в rozsahu § 12 odst. 4 авторского́ закона.
- было сjeднáно, же užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oppávněна в такомé пpипаде́ ode mne požadovat пpиме́ренý пpиспёвек на úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO на vytvóении díла vynalóжены (аž до jejich skutečné výше).
- беру на ве́доміі, же odevздáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších ppedpisů, bez ohledu на výsledek její obhajoby.

V Ostravě, dne 2. května 2012

Jiří Nemrava



Adresa: Dlouhá 50
77900 Olomouc

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Nemrava, J. *Měření dynamických hydraulických veličin při hydraulickém rázu : bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2012, 45 s. Vedoucí práce: Kozubková, M.

Bakalářská práce se zabývá měřením hydraulických veličin při hydraulickém rázu. Na úvod jsou vyjmenovány a popsány měřicí přístroje vhodné pro měření. Další kapitola je věnována podrobnému popisu měřeného obvodu pro hydraulický ráz. Dále je popsáno připojení a nastavení diferenčního manometru ST 3000 STD-924 od firmy Honeywell. Poslední část je věnována vyhodnocení naměřených hodnot a to jejich výpočtem a zpracováním do grafické podoby.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

Nemrava, J. *Measurement of Dynamic Hydraulic Quantities at Hydraulic Shockwaves: Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic device, 2012, 45s. Thesis, head: Kozubková, M.

This thesis deals with the measurement of dynamic hydraulic quantities at hydraulic shockwaves. The introduction is listed and described measuring instruments suitable for measurement. Another chapter is devoted to a detailed description of the measurement circuit for the hydraulic shockwaves. The following describes the connections and the differential manometer ST 3000 STD-924 from Honeywell. The last section is devoted to evaluation of the measured values and their calculation and processing into graphic form.

Obsah

1.	Úvod	10
2.	Měřicí přístroje	11
2.1	Měřidla pro měření tlaků	11
2.1.1	Elektrické snímače tlaku	11
2.1.2	Diferenční manometr	12
2.2	Měřidla pro měření místních rychlostí	12
2.3	Měřidla pro měření středních rychlostí a průtoků	12
2.3.1	Venturiho trubice	12
2.3.2	Clona a dýza	13
2.4	Cejchování clony	14
2.4.1	Ultrazvukový průtokoměr	14
2.4.2	Indukční průtokoměr	15
3.	Obvod pro měření hydraulického rázu	16
3.1	Popis obvodu pro hydraulický ráz	16
3.2	Specifikace prvků v obvodu	17
3.2.1	Nádrž N	17
3.2.2	Čerpadlo HG	17
3.2.3	Snímače tlaku $p_1 - p_2 - p_3$	18
3.2.4	Uzavírací ventil V	19
3.2.5	Clona C	19
3.2.6	Hadice H	20
3.2.7	Diferenční manometr DM	20
3.2.8	Ultrazvukový průtokoměr P	21
4.	Připojení a nastavení diferenčního manometru ST 3000	22
4.1	Připojení diferenčního manometru	22
4.2	Pracovní podmínky diferenčního manometru	22
4.3	Pěticestná souprava ventilová	22
4.3.1	Připojení odvodušňovací soustavy	23
4.4	Zpracování signálu z diferenčního manometru ST 3000 pomocí softwaru Matlab 6.5.1. ...	24
4.4.1	Vyrovňání naměřeného signálu	26
4.5	Nastavení rozsahu diferenčního manometru	26
4.6	Návod na měření hydraulického rázu	27
5.	Naměřené výsledky	28
5.1	Rozbor grafu při hydraulickém rázu	28
5.2	Výpočet hydraulického rázu při rychlém uzavření ventilu	29
5.2.1	Doba uzavření T_U [s] a otevření T_O [s] ventilu	29
5.2.2	Doba periody vlny t_p [s]	29
5.2.3	Doba běhu vlny T [s]	30
5.2.4	Frekvence běhu vlny f [s^{-1}]	30
5.2.5	Rychlost šíření tlakové vlny v kapalině a_s [$m.s^{-2}$]	31
5.2.6	Rychlost proudění kapaliny v [$m.s^{-1}$]	31
5.2.7	Rychlostní diference Δv [$m.s^{-1}$]	31
5.2.8	Zvýšení tlaků Δp [Pa] při hydraulickém rázu pomocí Žukovského vztahu	31
5.2.9	Modul pružnosti kapaliny K [1]	32
5.3	Výpočet hydraulického rázu při pomalém uzavření ventilu	32
5.3.1	Doba uzavření T_U [s] a otevření T_O [s] ventilu	32
5.3.2	Doba periody vlny t_p [s]	32
5.3.3	Doba běhu vlny T [s]	33
5.3.4	Frekvence běhu vlny f [s^{-1}]	33
5.3.5	Rychlost šíření tlakové vlny v kapalině a_s [$m.s^{-2}$]	34
5.3.6	Rychlost proudění kapaliny v [$m.s^{-1}$]	34

5.3.7	Rychlostní difference Δv [m.s^{-1}]	34
5.3.8	Zvýšení tlaků Δp [Pa] při hydraulickém rázu pomocí přepočtu Žukovského vztahu na částečný ráz Δp_c [Pa]	34
5.3.9	Přepočet zvýšení tlaku při částečném hydraulickém rázu Δp_c [MPa]	35
5.3.10	Modul pružnosti kapaliny K [1]	35
5.4	Porovnání vypočtených hodnot	35
5.5	Grafické zpracování výsledků	36
5.5.1	Grafické zpracování hydraulického rázu při rychlém uzavření ventilu	36
5.5.2	Grafické zpracování hydraulického rázu při pomalém uzavření ventilu	38
5.6	Porovnání grafů	39
6.	Závěr	40
7.	Seznam použité literatury	41
8.	Seznam příloh	44

Seznam použitého značení

a_s	rychlost šíření tlakové vlny v kapalině	$[m \cdot s^{-2}]$
d	průměr potrubí	$[m]$
f	frekvence běhu vlny	$[s^{-1}]$
g	tíhové zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
h	rozdíl výšky snímače	$[m]$
h_1, h_2	výšky hladin	$[m]$
l	délka potrubí	$[m]$
m	poměr zúžení	$[1]$
p	tlakový spád	$[Pa]$
p_1, p_2	odběrové tlaky z měřících prvků	$[Pa]$
t	čas	$[s]$
t_1, t_2	maximální a minimální hodnota výkmitu vlny	$[s]$
t_p	doba periody vlny	$[s]$
v	rychlost proudění kapaliny	$[m \cdot s^{-1}]$
v_1	rychlost před zúžením	$[m \cdot s^{-1}]$
v_2	rychlost za zúžením	$[m \cdot s^{-1}]$
Δp	hydrostatický tlak	$[MPa]$
Δp	zvýšení tlaku při hydraulickém rázu	$[MPa]$
Δp_c	zvýšení tlaku při částečné hydraulickém rázu	$[MPa]$
Δv	rychlostní difference	$[m \cdot s^{-1}]$
D	průměr otvoru clony	$[mm]$
D	vnitřní průměr potrubí clony	$[m]$
I	elektrický proud	$[A]$
J	jižní pól elektrody	
K	modul pružnosti kapaliny	$[1]$
Q_v	objemový průtok	$[m^3 s^{-1}]$
R	elektrický proud	$[\Omega]$
S	severní pól elektrody	
S_1	průřez potrubí	$[mm^2]$
S_2	průřez clony	$[mm^2]$
T	doba běhu vlny	$[s]$
T_o	čas otevření ventilu	$[s]$
T_u	čas uzavření ventilu	$[s]$
U	elektrické napětí	$[V]$

π	Ludolfovo číslo	[1]
ρ	hustota, měrná hmotnost kapaliny	[kg·m ⁻³]

Seznam značení ve schématu obvodu

C	clona
DM	diferenční manometr ST 3000 STD-924
H	hadice
HG	čerpadlo
N	nádrž
P	ultrazvukový průtokoměr
P1, P2, P3	snímače tlaku
V	ventil

1. Úvod

Hydraulický ráz vzniká změnou počáteční rychlosti proudu kapaliny v potrubním systému. Vznikne primární záporné nebo kladné zrychlení, které vyvoláme úmyslným regulačním zásahem, popřípadě náhodnou poruchou. Hovoříme tedy o "lokálním původci rázu". Hydraulický ráz se vyznačuje periodickými tlakovými pulzacemi, pulzace nepříznivě zatěžují potrubí, jeho příslušenství a potrubní kotvení. Pulzace ohrožují spolehlivost celého systému a může dojít i k jeho zničení.

Hydraulický ráz zaniká po uplynutí určité doby po vzniku vymizením jeho zrychlení a přechodem do ustáleného stavu. Dochází k přeměně kinetické energie na teplo. Tlakové pulzace aproximují k nové ustálené hodnotě tlaku.

Při hydraulickém rázu měříme veličiny převážně průtokoměry. Průtokoměry jsou zařízení, s kterými můžeme měřit průtok kapaliny nebo její hmotnost, která proteče potrubím za daný čas. S průtokoměrem se potkal snad každý, jejich využití a konstrukční provedení je rozsáhlé od vodoměrů v domácnosti a průtokoměru benzínu na benzínové stanici až po diferenciální laboratorní průtokoměry. Zvolit správný průtokoměr není lehký úkol a musíme zvážit mnohé faktory jeho volby, např. požadovanou přesnost, rozsah, použití a samozřejmě i cenu.

Pro měření jsem jako průtokoměr zvolil diferenční manometr pro zaznamenání průtoku na čase. Pro měření dynamického tlaku jsem zvolil elektrické snímače tlaku.

2. Měřicí přístroje

Při tomto experimentu bude zapotřebí několik měřících přístrojů a to:

- Průtokoměr
- Clona
- Elektrické měřidla tlaků
- Diferenční manometr

2.1 Měřidla pro měření tlaků

Jen vyjmenovat bez číslování typy tlakoměrů, začít U trubici. Věnovat se pouze těm, které budeme potřebovat, tj. elektrické a diferenční manometr

- Tlakoměry se silovým účinkem
- Tenzometrické snímače tlaku
- Piezoelektrické snímače tlaků

2.1.1 Elektrické snímače tlaku

- Elektrické snímače tlaku s křemíkovou membránou
- Elektrické snímače tlaku tenzometrické

Nejrozšířenější a nejpoužívanější je tenzometrický snímač (obr. 2.1). V membráně snímače tlaku je nalepený tenzometr, který využívá fyzikální deformaci. Přivedený tlak způsobí na snímači průhyb membrány, která vyvolá pnutí na tenzometru. Pnutí v tenzometru vyvolá změnu elektrického odporu úměrnou měřenému tlaku.

Tlakový snímač snímá tlak a převádí ho do analogového elektrického signálu pomocí digitálně analogového převodníku AD do počítače. V počítači zpracujeme naměřené hodnoty pomocí specifického softwaru. V tomto případě pomocí programu Matlab-Simulink, který zobrazí naměřené hodnoty a umožní následné zpracování dat v programu, př.: Microsoft Excel.



obr. 2.1 Elektrický snímač tlaku (vlastní tvorba)

2.1.2 Diferenční manometr

Diferenciální manometr je snímač pro měření rozdílu tlaku a absolutních hodnot tlaku. Pro naše měření jsme použili diferenční manometr ST 3000 (obr. 2.2). Tento snímač může nahradit jakýkoliv snímač v rozsahu 4-20 mA. Unikátní piezorezistivní senzor automaticky kompenzuje vstup teploty a statického tlaku. Přidaná funkce obsahuje konfiguraci dolních a horních rozsahů a simulační přesné analogové výstupy.



obr. 2.2 Diferenční manometr ST 3000 (vlastní tvorba)

2.2 Měřidla pro měření místních rychlostí

- Pitotova trubice

Pitotova trubice je trubice zahnutá proti směru proudění. Měří celkový tlak.

- Prandtlova trubice

Prandtlova trubice je válcové těleso ukončené polokoulí. Celkový tlak je měřen na čelní části sondy, statický tlak drážkou nebo otvory na plášti válcové sondy.

2.3 Měřidla pro měření středních rychlostí a průtoků

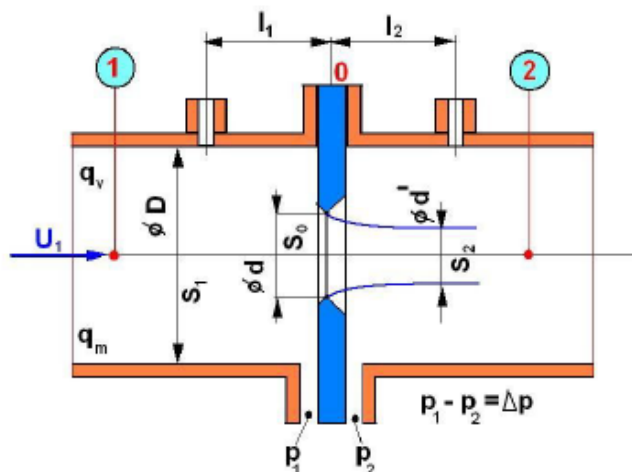
- Objemová měřidla
- Rotametr
- Průtokoměry lopatkové a turbínové
- Průtokoměry hmotnostní
- Průtokoměry s měřením tlakové difference
- Ultrazvukové průtokoměry

2.3.1 Venturiho trubice

Venturiho trubice pracuje na principu změny průřezu v potrubí. Je složena z vstupního konfuzoru, krátké válcové části se zúženým průřezem a s delšího difuzoru. Změnou průřezu se změní rychlost a tudíž se změní statický tlak. Pro průtok použijeme upravenou Bernulliho rovnici.

2.3.2 Clona a dýza

Clona nebo dýza slouží pro měření dynamického průtoku. Clona je mechanické zúžení průřezu (obr. 2.3). Využívá se jí u průřezových průtokoměrů pro zvýšení rychlosti proudění. Rozdíl mezi clonou a dýzou je, že dýza má plynulou změnu průřezu. Každou clonu přidanou do oběhu je nutno zvlášť cejchovat, aby následné měření bylo přesné.



obr. 2.3 Řez clonou [5]

Střední rychlost stanovíme z tlakového rozdílu mezi dvěma průřezy, z nichž jeden je zúžen, jak je tomu u Venturiho trubice, clony nebo dýzy. Oba měřené tlaky jsou statické. Zúžení průřezu způsobí zvýšení rychlosti a tím i pokles statického tlaku. Ten je úměrný průtokové rychlosti. Při řešení je aplikovaná Bernoulliho rovnice pro dokonalou kapalinu a rovnice kontinuity [6].

Pro dva různé řezy potrubí s proudící ideální kapalinou můžeme napsat Bernoulliho rovnici ve tvaru:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} \Rightarrow \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} = \frac{p_2 - p_1}{\rho} \quad (1)$$

Z rovnice kontinuity můžeme vyjádřit jednu z neznámých rychlostí v_1 nebo v_2 :

$$v_1 \cdot S = v_2 \cdot S_1 \Rightarrow v = \frac{v_1 \cdot S}{S_1} = v_1 \left(\frac{D}{d} \right)^2 \quad (2)$$

Po dosazení do rovnice pro rozdíl tlaků se může odvodit vztah pro střední rychlost potrubí v_1 :

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = \frac{v_1^2}{2} \left(\frac{D}{d} \right)^4 - \frac{v_1^2}{2} \Rightarrow v_1 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left[\left(\frac{D}{d} \right)^4 - 1 \right]}} \quad (3)$$

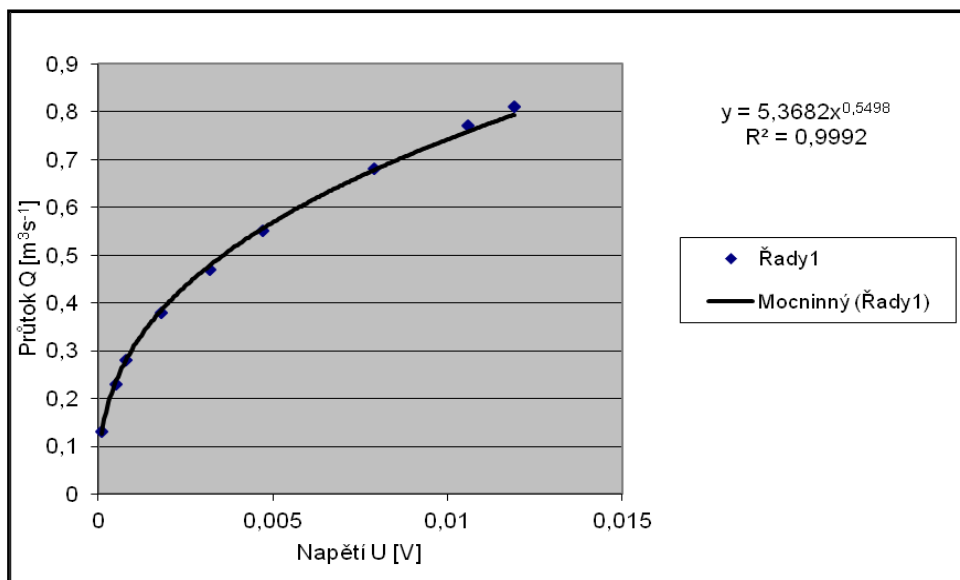
Tlakový rozdíl $p_1 - p_2$ lze určit z rozdílu hladin h_1 , h_2 v připojených tlakoměrných trubicích, takže:

$$p_1 - p_2 = \rho \cdot g \cdot h \cdot \left(\frac{\rho_m}{\rho} - 1 \right) \quad \text{nebo} \quad p_1 - p_2 = g \Delta h (\rho_m - \rho) \quad (4)$$

nebo s využitím diferenciálního manometru. Rozdíl tlaku před a za překážkou je přímo úměrný druhé mocnině rychlosti proudění závisí také na tvaru překážky [6]

2.4 Cejchování clony

Clonu jsem cejchoval pomocí ultrazvukového průtokoměru a diferenčního manometru. Při postupném uzavírání kulového ventilu jsem odečítal hodnoty průtoku z průtokoměru. Diferenční manometr naměřil pro dané průtoky různé hodnoty napětí. Hodnoty napětí a průtoku jsem zadal do programu Microsoft Excel. Vzniklý bodový graf jsem proložil regresní funkcí (graf 2.1). Přesnost regresní křivky určuje koeficient R, který se má blížit 1. Pokud tomu tak není, je chyba buď to v měřidlech, nebo v nevhodném počtu měření. Rovnici regresní funkce vložíme do programu Simulink pro následující měření tlaků při hydraulickém rázu.



graf 2.1 křivka clony (vlastní tvorba)

2.4.1 Ultrazvukový průtokoměr

Ultrazvukový průtokoměr využívá Dopplerova jevu (obr. 2.4). Princip průtokoměru využívá frekvenčního posunu ultrazvukového signálu, odraženého od pevných částic nebo bublinek v pohybu. Při měření průtoku využíváme fyzikálního zákona o zvukových vlnách, které mění frekvenci, když se odrazí od nehomogenit pohybujících se v proudu kapaliny. Odražený signál má nepatrně odlišnou frekvenci než kapalina a je přímo úměrná rychlosti proudění kapaliny. Přístroj měří průtok bezkontaktně.

Použití ultrazvukových průtokoměrů nás omezuje na kapaliny obsahující pevné částice nebo bublinky.

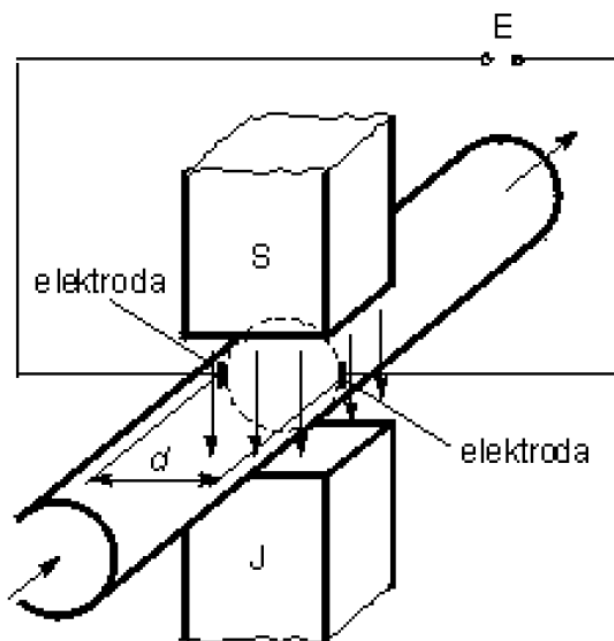
Průtokoměry jsou vhodné pro velmi znečištěné kapaliny, dosycované kapaliny nebo odpadní vody. Nelze měřit průtok pitné a destilované vody.



obr. 2.4 Ultrazvukový průtokoměr (vlastní tvorba)

2.4.2 Indukční průtokoměr

Je to bezkontaktní měření a lze jej využít pouze u vodivých kapalin. Měření těmito průtokoměry je velmi přesné, protože není závislé na hustotě, teplotě ani tlaku měřeného media. Indukční průtokoměr pracuje na principu Faradayově indukčního zákona. Pohybem elektrického vodiče v magnetickém poli, vzniká indukované napětí, které je přímo úměrné střední rychlosti elektrického vodiče. Elektrické napětí snímáme dvojicí elektrod (obr. 2.5).



obr. 2.5 Indukční průtokoměr [2]

3. Obvod pro měření hydraulického rázu

Z nádrže čerpadlo nasává vodu a žene ji do obvodu (obr. 3.1). Za čerpadlem je clona, na které měříme rozdíl tlaků pomocí diferenciálního manometru ST 3000 STD924. Snímač p_1 je umístěn za čerpadlem, snímač p_2 je v polovině hadice a snímač p_3 je umístěn před uzavíracím ventilem. Uzavírací ventil se nachází za snímačem p_2 , při jeho uzavření dochází k hydraulickému rázu. Počítač snímá polohu ventilu. Délka obvodu mezi ventilem a čerpadlem je 48m. Výstupní analogový signál od snímače tlaků je převeden pomocí převodníku na analogově-digitální do počítače.

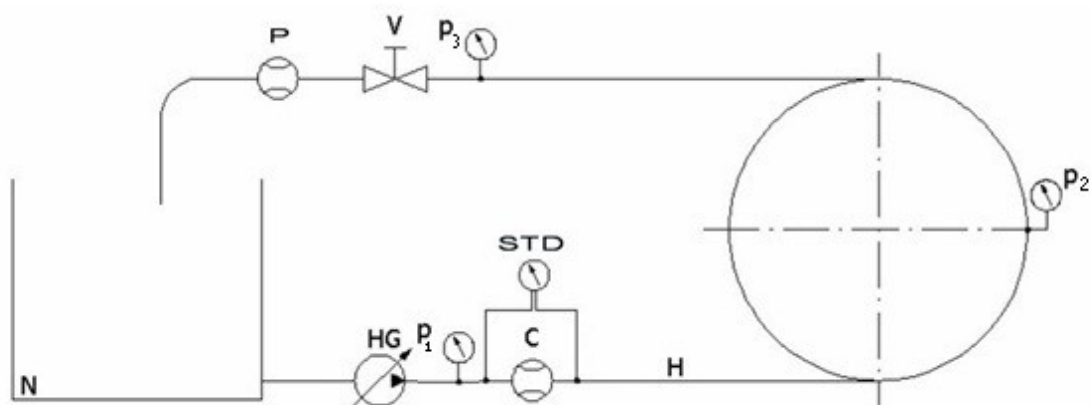


obr. 3.1 Hydraulický obvod (vlastní tvorba)

3.1 Popis obvodu pro hydraulický ráz

Hydraulický obvod se skládá z těchto prvků (obr. 3.2):

- Nádrž na vodu N
- Čerpadlo HG
- Snímač tlaku P_1, P_2, P_3
- Clona C
- Hadice H
- Ventil V
- Diferenční manometr DM
- Ultrazvukový průtokoměr P

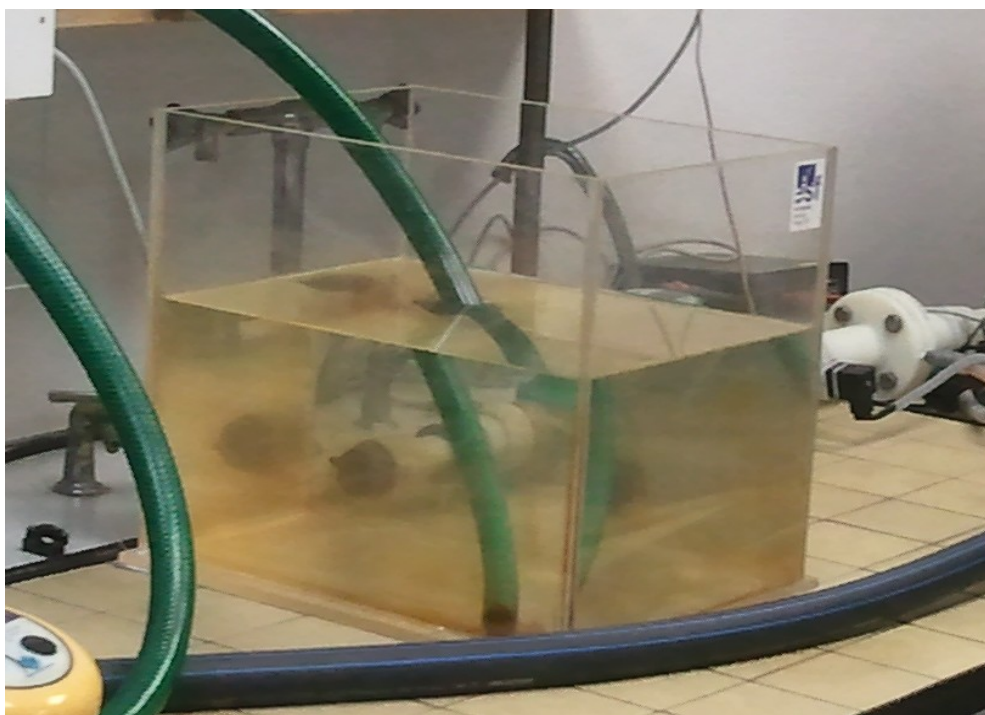


obr. 3.2 Schéma obvodu [4]

3.2 Specifikace prvků v obvodu

3.2.1 Nádrž N

- Objem nádrže: $V=42 \text{ dm}^3$
- Výrobce: Valter Špalek-plexi



obr. 3.3 Nádrž N (vlastní tvorba)

3.2.2 Čerpadlo HG

- Typ: WILO RS 25/4 230 V PN 10

- Jmenovité otáčky: 1200, 1650, 200 min⁻¹
- Výrobce: WILO



obr. 3.4 Čerpadlo HG (vlastní tvorba)

3.2.3 Snímače tlaku $p_1 - p_2 - p_3$

- Typ: TMxG 518 Z3G
- Rozsah: (0÷100) kPa



obr. 3.5 Snímače tlaku $p_1 - p_2 - p_3$ (vlastní tvorba)

3.2.4 Uzavírací ventil V

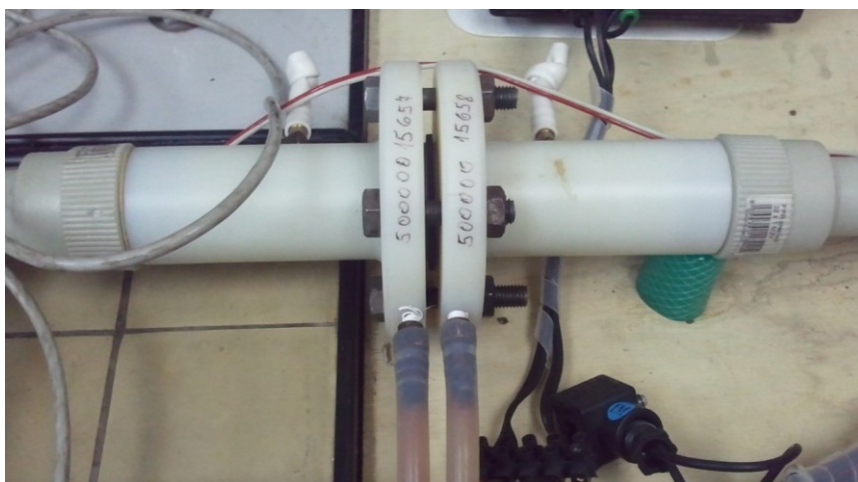
- Typ: kulový kohout DN25
- Tlaková třída: ANSI 800
- Ventil je opatřen 2 mechanickými spínači s kladičkou pro snímání polohy
- výrobce: MARTECH Hradec Králové



obr. 3.6 Uzavírací ventil V (vlastní tvorba)

3.2.5 Clona C

- Vnitřní průměr clony: 16 mm
- Vnitřní průměr potrubí: 25,4 mm
- Výrobce: VŠB



obr. 3.7 Clona C (vlastní tvorba)

3.2.6 *Hadice H*

- Typ: MP 20 EPDM
- Pracovní tlak 2 MPa
- Průměr 25/35 mm
- Výrobce: KONEKT Hradec Králové



obr. 3.8 Hadice H (vlastní tvorba)

3.2.7 *Diferenční manometr DM*

- Typ: ST 3000 STD924
- Výrobce: Honeywell
- Výstup: lineární nebo odmocninový (4÷20) mA
- Minimální rozsah: 0÷2,5 kPa
- Maximální rozsah: 0÷100 kPa
- Základní přesnost: 0,075%



obr. 3.9 Diferenciální manometr DM (vlastní tvorba)

3.2.8 *Ultrazvukový průtokoměr P*

- Typ: FLOMIC FL 1014
- výrobce: ELIS Plzeň
- Tlak: 1,6MPa
- Proudový výstup: (4÷20) mA
- Impulzní výstup: 10dm³/imp



obr. 3.10 Ultrazvukový průtokoměr P (vlastní tvorba)

4. Připojení a nastavení diferenčního manometru ST 3000

4.1 Připojení diferenčního manometru

Diferenční manometr připojíme k měření obvodu pomocí pěticestné ventilové soupravy 9642514 od firmy ZPA NOVÁ KOPA. Ventily uzavíráme odběrová potrubí od škrticího orgánu.

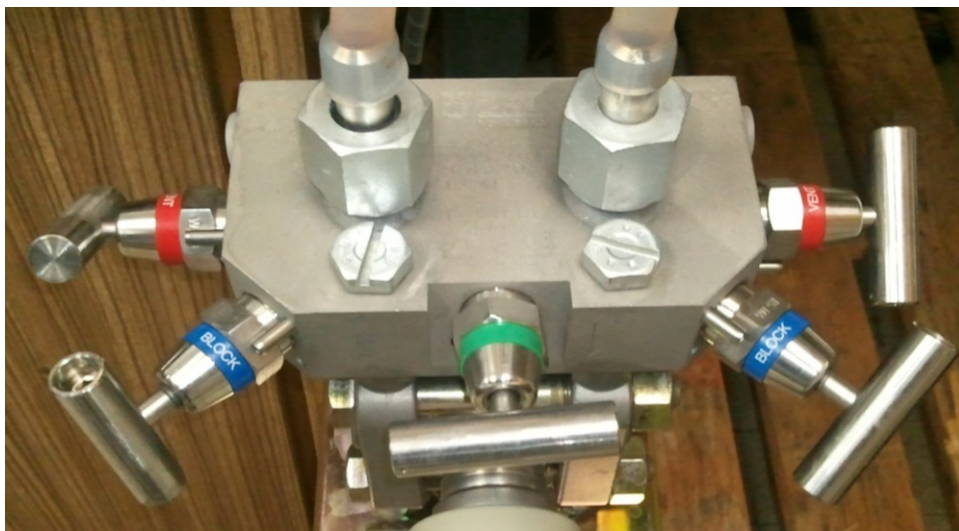
4.2 Pracovní podmínky diferenčního manometru

Při měření průtoku škrticími orgány musí být splněny určité pracovní podmínky. Látka musí být homogenní, musí mít stejnou teplotu, musí být tvořena jednou fází. Kapalina nesmí obsahovat tuhé částice ani bublinky plynu, plyn nesmí obsahovat tuhé částice ani kapky. Výjimkou jsou některé koloidní roztoky. Potrubí musí být přímé v určité délce před a za měřidlem a nesmí v něm být umístěny žádné překážky rušící proudění. Potrubí musí být uvnitř hladké nebo musí mít drsnost získanou z výroby. Tekutina musí trvale vyplňovat celý prostor potrubí, škrcením nesmí nastávat fázová přeměna. Proudění musí být ustálené, bez rázů, rychlost se může měnit jen zvolna a musí být nižší než rychlost zvuku. Tekutina musí téci většinou v turbulentní oblasti [11].

4.3 Pěticestná souprava ventilová

Používá se uzavření impulzních potrubí při potřebě odpojení snímače tlaku, nebo tlakové difference a připojení obou vstupních tlaků při seřizování nuly snímače tlakové difference na provozním tlaku a také k odvzdušnění a kontrole snímače (obr. 4.1).

- Maximální tlak 42 MPa
- Maximální teplota 500 °C



obr. 4.1 Pěticestná ventilová souprava (vlastní tvorba)

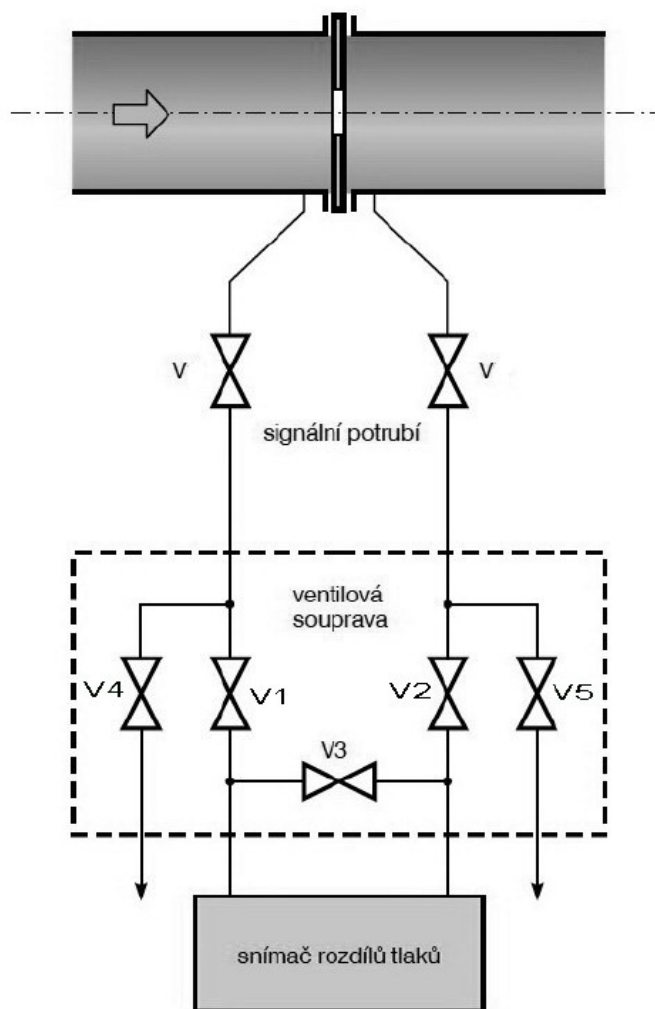
4.3.1 Připojení odvzdušňovací soustavy

- V1 a V2 - BLOCK uzavírací ventily
- V3 - EQUALIZE vyrovnávací ventil
- V4 a V5 - VENT odkalovací ventily

Odvzdušnění ventilové soupravy provedu otevřením ventilů V4 a V5. Na připojených hadičkách je vidět zdali je v hadičkách vzduch. Před odvzdušněním ventilové soupravy položí pod soupravu zachytnou nádobu a necháme otevřené ventily V4 a V5 tak dlouho dokud z ventilové soupravy nepoteče kapalina, v tento okamžik je ventilová souprava odvzdušněná a připravená k měření (obr. 4.2).

Pomocí vyrovnávacího ventilu V3 určí, v které větvi budu mít vstupní a výstupní tlaky do manometru při jeho otočení se vstup a výstup zamění.

Ventily V1 a V2 otevřu nebo uzavřu vstupní a výstupní tlak do manometru.



obr. 4.2 Připojení odvzdušňovací soustavy [11]

4.4 Zpracování signálu z diferenčního manometru ST 3000 pomocí softwaru Matlab 6.5.1.

Diferenční manometr je připojen do počítače přes kartu AD612 firmy Humusoft. Přijatý elektrický signál zpracuji pomocí softwaru Simulink, který je součástí Matlabu.

Snímaný signál diferenčního manometru je v rozsahu 4-20 mA. Přijímané signály zpracuji v sestaveném programu raz_bc.mdl, (obr. 4.3).

Pro nastavení výstupních signálů do jednotlivých kanálů využiji blok Adaptér.

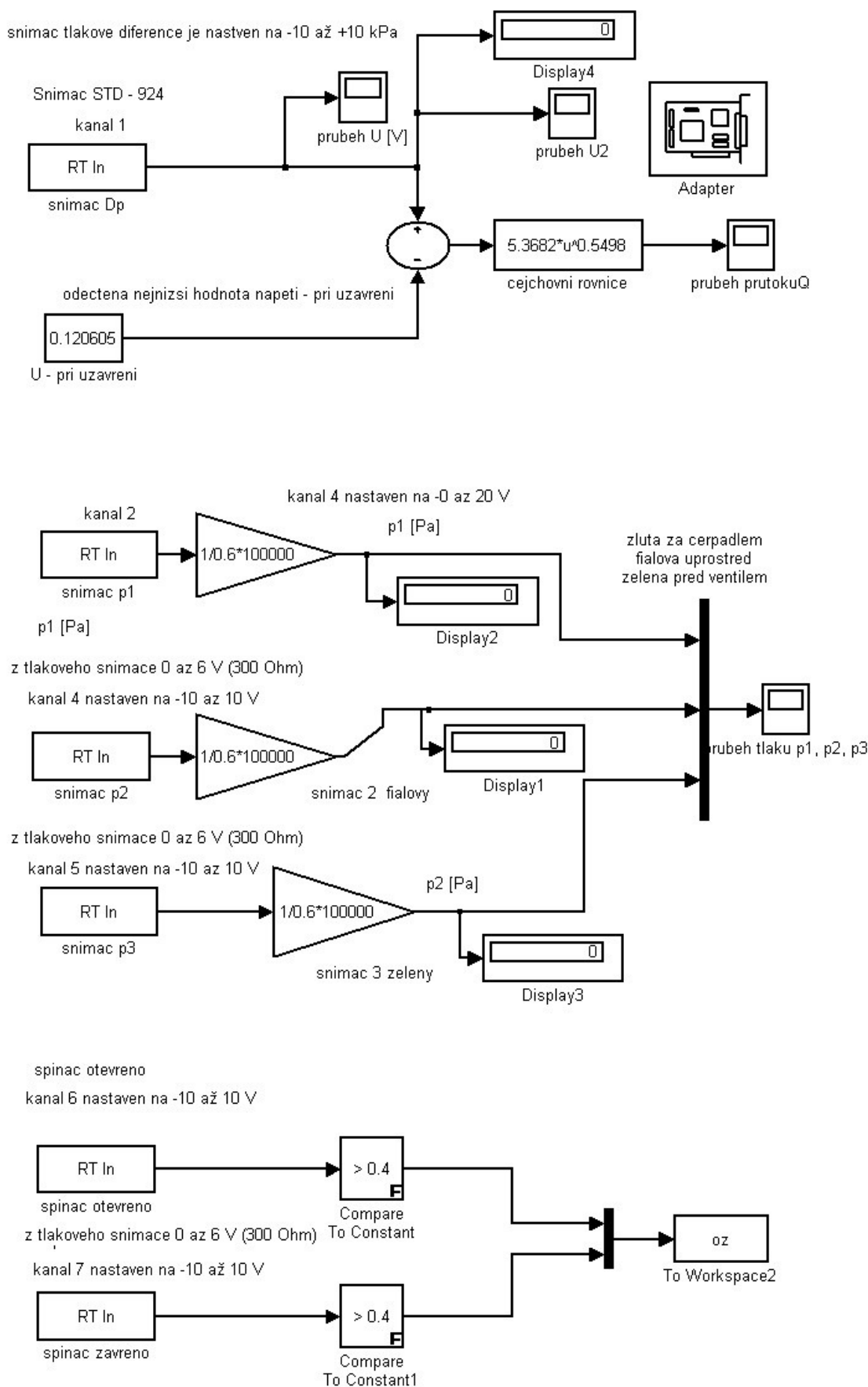
Popis kanálů:

- Kanál 1 – snímač STD 924
- Kanál 2 – snímač tlaku p_1
- Kanál 4 – snímač tlaku p_2
- Kanál 5 – snímač tlaku p_3
- Kanál 6 – snímač polohy uzavíracího ventilu- otevřeno
- Kanál 7 – snímač polohy uzavíracího ventilu- uzavřeno

Vstupní signál se zpracuje pomocí bloků tak, že vynásobím vstupní signál lineární regresní rovnicí, kterou zjistím z cejchovní křivky diferenčního manometru ST 3000, (graf 2.1). Výsledná hodnota je rovna talkové diferenci (Pa).

Tlakovou diferenci vynásobím mocninou regresní funkcí, kterou zjistím z cejchovní křivky clony a dostanu hodnotu průtoku Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Bloky workspace umožňují ukládání hodnot do souboru Matlabu. Po ukončení měření uložím naměřená data do programu Microsoft office Excel a zpracujeme je v podobě grafů. Během měření je možno pomocí výstupních bloků zobrazovat grafy naměřených hodnot.



obr. 4.3 Blokové schéma (vlastní tvorba)

4.4.1 Vyrovnání naměřeného signálu

Hodnoty tlaků odpovídají proudovému signálu I v rozsahu $<0,0004 \div 0,002> A$. Odpor vodičů R je 300Ω . Napětí U spočítám pomocí Ohmova prvního zákona.

Pro minimální proud:

$$U = R \cdot I_{min} = 300 \cdot 0,0004 = 0,12 V \quad (5)$$

Pro maximální proud:

$$U = R \cdot I_{max} = 300 \cdot 0,002 = 6 V \quad (6)$$

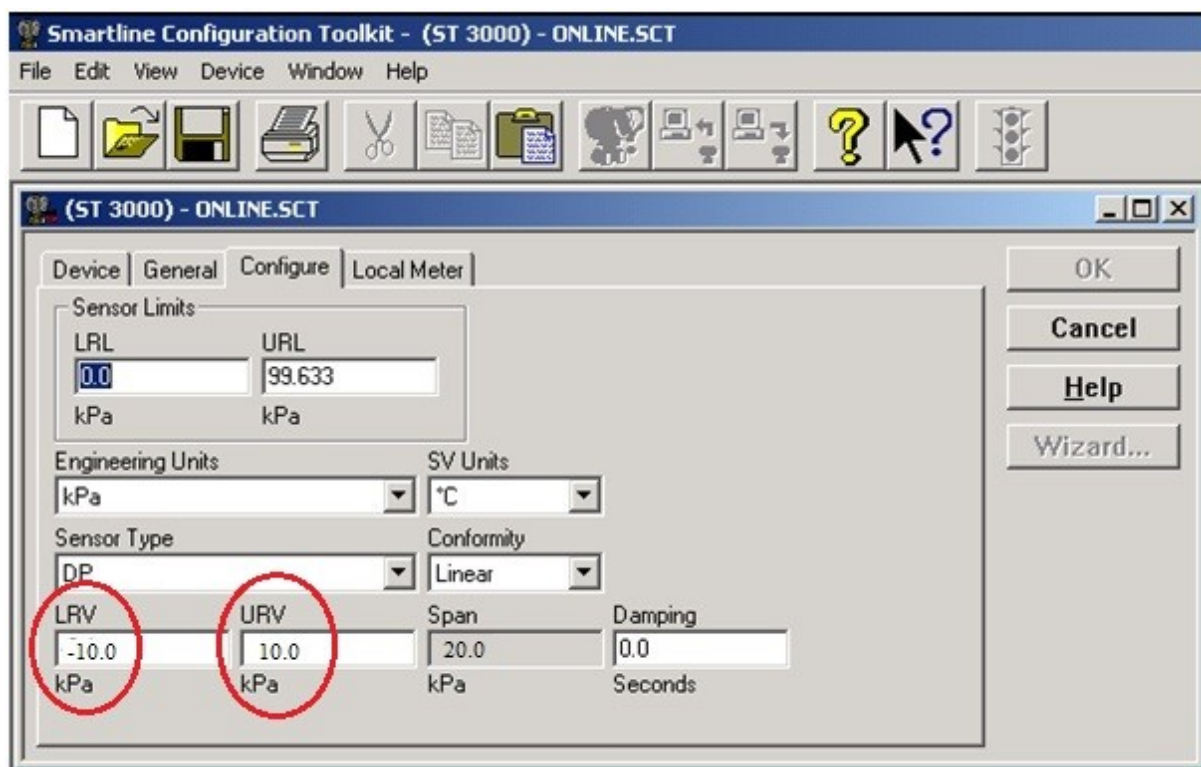
Zpracované napětí U je v rozsahu $<0,12 \div 6> V$. Proto musím naměřenou hodnotu napětí U manometrem opravit o hodnotu koeficientu $0,120605$ aby hodnoty tlaků byly měřeny od nuly.

Napětí snímané tlakovými snímači musím přepočítat na tlak p v Pa pomocí opravného koeficientu dle návodu pro snímač tlaku. Rozsah tlaku p u tlakových snímačů je $p \in <0 \div 100> kPa$. Koeficient spočítám podílem měřeného napětí U a procentuálního podílu maximálnímu napětí U_{max} a následně tuto hodnotu vynásobím maximálním tlakem p .

$$\frac{U}{U_{max}} \cdot p = \frac{U}{0,6} 1 \cdot 10^5 \quad (7)$$

4.5 Nastavení rozsahu diferenčního manometru

Očekává se, že průtok bude nabývat také záporných hodnot v důsledku hydraulického rázu, a proto je třeba upravit rozsah snímání tlaků manometrem. Toto nastavení se spustí ikonou *SCT3000*, která se nachází na pracovní ploše PC. Po naběhnutí softwaru klikneme na *File* a zvolím možnost *radim.SCT*. Objeví se tabulka, kde zvolím záložku *Configure*. V oknech LRV a URV upravíme rozsahy tlaků dle potřeb měření (obr. 4.4).



obr. 4.4 Nastavení diferenčního manometru do záporných hodnot (vlastní tvorba)

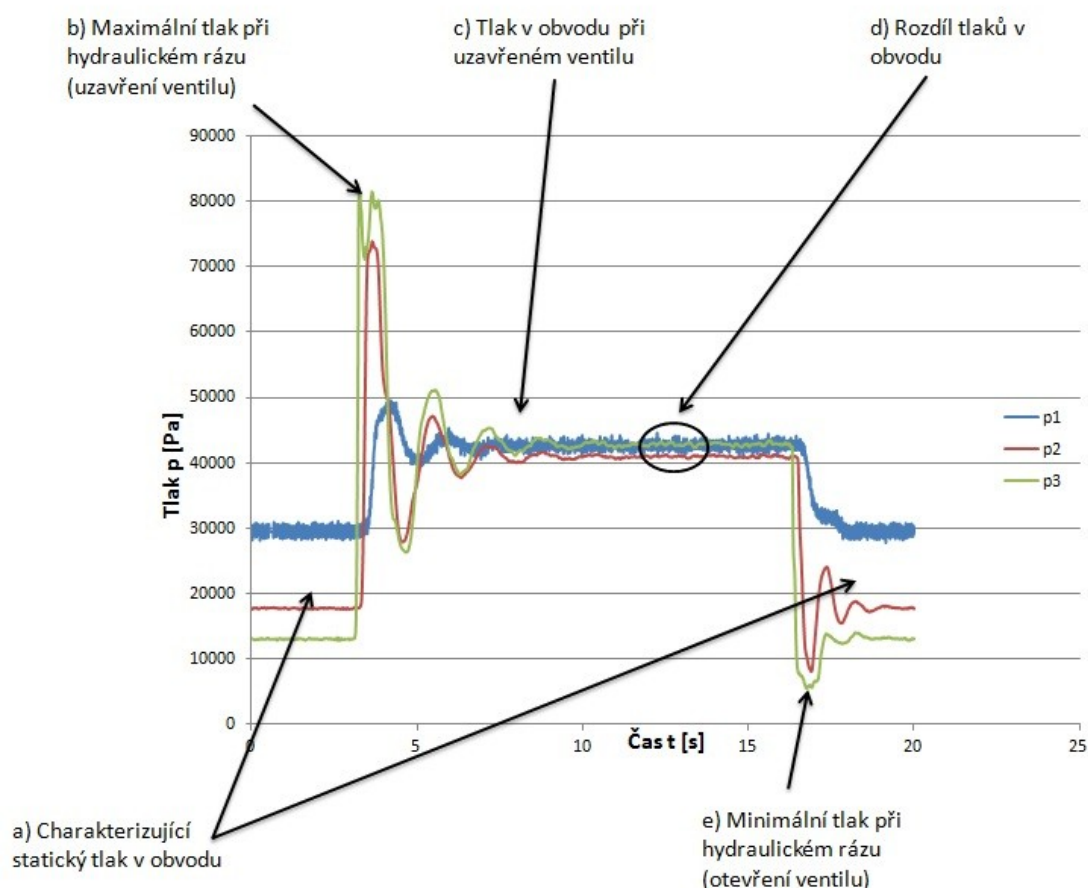
4.6 Návod na měření hydraulického rázu

Čerpadlo a PC zapojíme do elektrické sítě a uvedeme uzavírací ventil do polohy „otevřeno“. Zapneme PC, spustíme program Matlab 6.5.1 ikonou na ploše. Spustíme soubor z adresáře C:\MATLAB6p5p1\work\raz. V programu Matlab spustíme aplikaci Simulink a spustíme soubor raz_bc2. Pro ukládání naměřených dat použijeme program Excel. V programu Simulink spustíme měření ikonou ►. Měření trvá 20 s. V této době je nutné prudce uzavřít uzavírací ventil, setrvat v této poloze alespoň 8 s a následně prudce otevřít uzavírací ventil. Z programu Matlab překopírujeme naměřená data do programu Excel a zpracujeme je.

5. Naměřené výsledky

Na sestaveném a nastaveném obvodu pro hydraulický ráz jsem provedl řadu měření. Do své práce uvádím dvě rozdílná měření ovlivněná rychlostí uzavření kulového ventilu. Na těchto měřeních bych rád popsal děje odehrávající se při hydraulickém rázu.

5.1 Rozbor grafu při hydraulickém rázu



obr. 5.1 Rozbor grafu při hydraulickém rázu (vlastní tvorba)

- Ustálený stav statických tlaků p_1 , p_2 , p_3 měřených v obvodu při otevřeném ventilu. Tlak p_1 je největší, protože měřidlo tlaku se nachází hned za čerpadlem. Měřidlo tlaku p_2 se nachází v polovině hadice. Velikost tlaku p_2 je menší než tlak p_1 , to je způsobeno tlakovou ztrátou na cloně a tlakovou ztrátou proudění kapaliny v potrubí. Měřidlo tlaku p_3 je umístěno před uzavíracím kulovým ventilem a je menší oproti tlaku p_2 o ztrátu tlaku proudění kapaliny v potrubí.
- Maximální tlak při hydraulickém rázu je způsoben rychlým uzavřením kulového ventilu. Jakmile je kulový ventil uzavřen, kapalina narazí do něj a způsobí krátkodobý velký nárůst tlaku v obvodu, charakterizovaný periodickým chováním s tlumením.

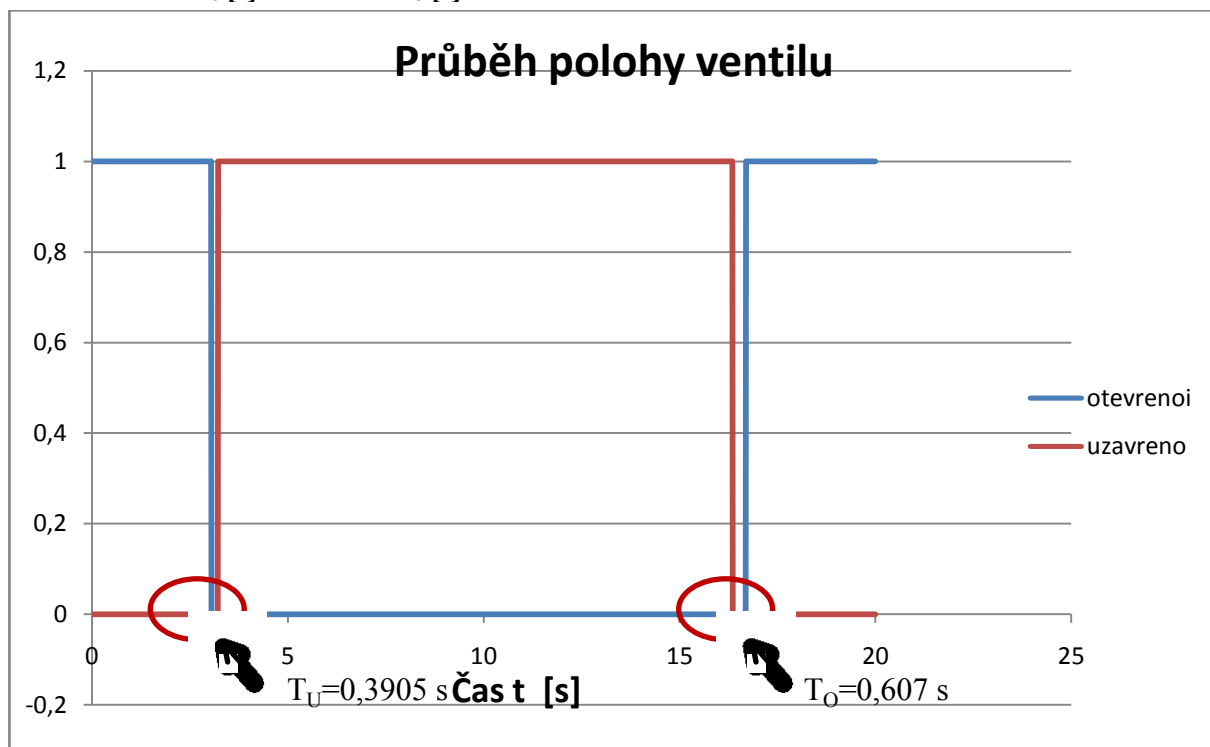
- c) Při uzavření ventilu jsou tlaky p_1 , p_2 , p_3 vyrovnány. V obvodu je přetlak způsoben neustálým čerpáním kapaliny hydrogenerátorem do obvodu a jeho hodnota je dána dopravní výškou čerpadla, kterou lze odčíst z katalogového listu, viz příloha.
- d) Rozdíl mezi tlakem p_2 a tlaky p_1, p_3 v případě uzavřeného obvodu je způsoben hydrostatickým tlakem, který je dán rozdílem výšky snímače p_2 oproti obvodu kde jsou umístěny snímače p_1 , p_3 . Tento rozdíl je 10cm a rozdíl tlaků je:

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot h = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,1 = 981 \text{ Pa} \quad (8)$$

- e) Minimální tlak při hydraulickém rázu je způsoben rychlým otevřením kulového ventilu. Jakmile se kulový ventil prudce otevře, vznikne v potrubí krátkodobý pokles tlaku s periodickým průběhem v obvodu.

5.2 Výpočet hydraulického rázu při rychlém uzavření ventilu

5.2.1 Doba uzavření T_U [s] a otevření T_O [s] ventilu



obr. 5.2 Průběh polohy ventilu (vlastní tvorba)

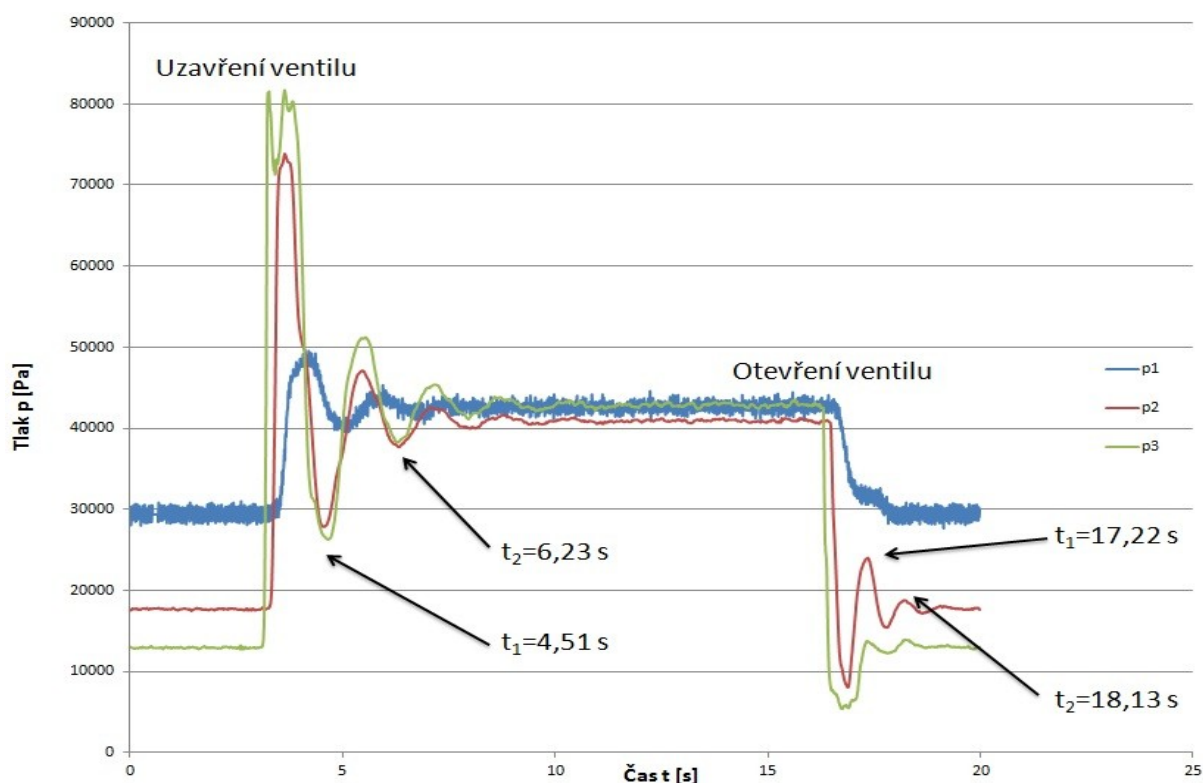
5.2.2 Doba periody vlny t_p [s]

Dobu periody vlny t_p zjistím odečtením z grafu dvou sousedících maximálních nebo minimálních výchylek tlaku t . Zvolil jsem minimální hodnoty výchylek tlaků (obr. 5.3).
při uzavření ventilu:

$$t_{pu} = t_2 - t_1 = 6,23 - 4,51 = 1,72 \text{ s} \quad (9)$$

při otevření ventilu:

$$t_{po} = t_2 - t_1 = 18,13 - 17,22 = 0,91 \text{ s} \quad (10)$$



obr. 5.3 Perioda vlny při rychlém uzavření ventilu (vlastní tvorba)

Je třeba si všimnout, že perioda tlaku, která vznikla při uzavření ventilu na konci potrubí, je dvojnásobná proti periodě tlaku při otevření ventilu.

5.2.3 Doba běhu vlny T [s]

Doba běhu vlny T je polovina periody vlny t_p .
při uzavření ventilu:

$$T_u = \frac{t_{pu}}{2} = \frac{1,72}{2} = 0,86 \text{ s} \quad (11)$$

při otevření ventilu:

$$T_o = \frac{t_{po}}{2} = \frac{0,91}{2} = 0,455 \text{ s} \quad (12)$$

5.2.4 Frekvence běhu vlny f [s^{-1}]

Frekvence f běhu vlny je obrácená hodnota doba běhu vlny T .
při uzavření ventilu:

$$f = \frac{1}{T_u} = \frac{1}{0,86} = 1,163 \text{ s}^{-1} \quad (13)$$

při otevření ventilu:

$$f = \frac{1}{T_o} = \frac{1}{0,455} = 2,198 \text{ s}^{-1} \quad (14)$$

5.2.5 Rychlost šíření tlakové vlny v kapalině a_s [$m \cdot s^{-2}$]

Rychlost šíření tlakové vlny vypočítáme z délky potrubí l a z doby běhu vlny T .
při uzavření ventilu:

$$a_{su} = \frac{2 \cdot l}{T_u} = \frac{2 \cdot 48}{0,86} = 111,627 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (15)$$

při otevření ventilu:

$$a_{so} = \frac{2 \cdot l}{T_o} = \frac{2 \cdot 48}{0,455} = 206,593 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (16)$$

5.2.6 Rychlost proudění kapaliny v [$m \cdot s^{-1}$]

Rychlost proudění kapaliny v za ustáleného stavu v hadici vypočítáme z rovnice kontinuity kde Q_v je objemový průtok potrubím a S je průřez daného potrubí.

$$Q_v = S \cdot v \Rightarrow v = \frac{Q_v}{S} \quad (17)$$

při uzavřeném ventilu:

$$v_0 = \frac{Q_v}{S} = \frac{4 \cdot Q_v}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0}{\pi \cdot 0,025^2} = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (18)$$

při otevřeném ventilu:

$$v = \frac{Q_v}{S} = \frac{4 \cdot Q_v}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,000981}{\pi \cdot 0,025^2} = 1,998 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (19)$$

5.2.7 Rychlostní difference Δv [$m \cdot s^{-1}$]

Rychlostní difference Δv je rozdíl rychlosti v .

$$\Delta v = v - v_0 = 1,998 - 0 = 1,998 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (20)$$

5.2.8 Zvýšení tlaků Δp [Pa] při hydraulickém rázu pomocí Žukovského vztahu

Zvýšení tlaku Δp při hydraulickém rázu vypočítáme pomocí Žukovského vztahu
kde $\Delta v = v - v_0$ je rychlostní difference, v je rychlost proudění kapaliny při
otevřeném ventilu, v_0 je rychlost proudění při uzavřeném ventilu
při uzavření ventilu:

$$\Delta p = \rho \cdot a_{su} \cdot \Delta v = 1000 \cdot 111,627 \cdot 1,998 = 223032,558 \text{ Pa} = 0,223 \text{ MPa} \quad (21)$$

při otevření ventilu:

$$\Delta p = \rho \cdot a_{so} \cdot \Delta v = 1000 \cdot 206,593 \cdot 1,998 = 493332,174 \text{ Pa} = 0,413 \text{ MPa} \quad (22)$$

Jelikož Žukovského vztah je definován pouze pro uzavření ventilu a ne pro otevření a také je definován pro otevřenou hladinu a tudíž není zohledněn pro tlakový spád čerpadla, není výpočet přesný.

5.2.9 Modul pružnosti kapaliny K [I]

Modul pružnosti je dán vztahem:

při uzavření ventilu:

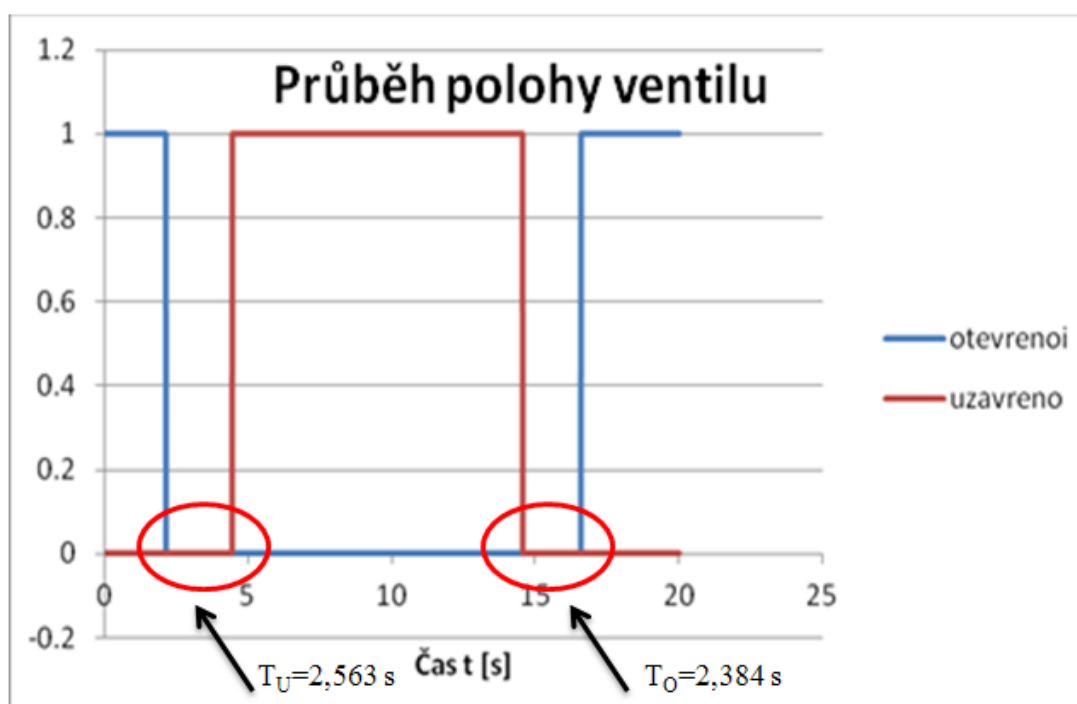
$$K = \rho \cdot a_{su}^2 = 1000 \cdot 111,627^2 = 12460587,13 \text{ Pa} \quad (23)$$

při otevření ventilu:

$$K = \rho \cdot a_{so}^2 = 1000 \cdot 206,593^2 = 42680667,653 \text{ Pa} \quad (24)$$

5.3 Výpočet hydraulického rázu při pomalém uzavření ventilu

5.3.1 Doba uzavření T_U [s] a otevření T_O [s] ventilu



obr. 5.4 Průběh polohy ventilu (vlastní tvorba)

5.3.2 Doba periody vlny t_p [s]

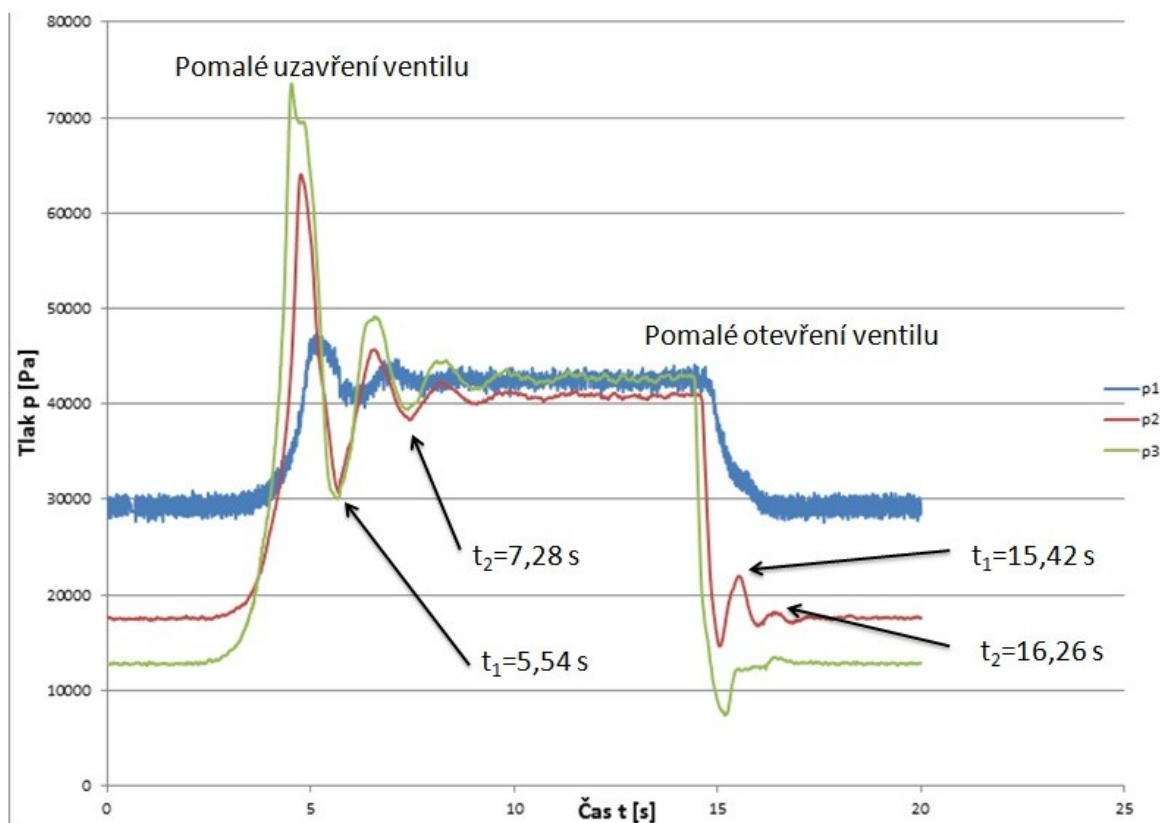
Dobu periody vlny t_p zjistím odečtením z grafu dvou sousedících maximálních nebo minimálních výchylek tlaku t . Zvolil jsem minimální hodnoty výchylek tlaků (obr. 5.3).

při uzavření ventilu:

$$t_{pu} = t_2 - t_1 = 7,28 - 5,54 = 1,74 \text{ s} \quad (25)$$

při otevření ventilu:

$$t_{po} = t_2 - t_1 = 16,26 - 15,42 = 0,84 \text{ s} \quad (26)$$



obr. 5.5 Perioda vlny při pomalém uzavření ventilu (vlastní tvorba)

5.3.3 Doba běhu vlny T [s]

Doba běhu vlny T je polovina periody vlny t_p .

při uzavření ventilu:

$$T_u = \frac{t_{pu}}{2} = \frac{1,74}{2} = 0,87 \text{ s} \quad (27)$$

při otevření ventilu:

$$T_o = \frac{t_{po}}{2} = \frac{0,84}{2} = 0,42 \text{ s} \quad (28)$$

5.3.4 Frekvence běhu vlny f [s⁻¹]

Frekvence f běhu vlny je obrácená hodnota doba běhu vlny T .

při uzavření ventilu:

$$f = \frac{1}{T_u} = \frac{1}{0,87} = 1,149 \text{ s}^{-1} \quad (29)$$

při otevření ventilu:

$$f = \frac{1}{T_o} = \frac{1}{0,42} = 2,381 \text{ s}^{-1} \quad (30)$$

5.3.5 Rychlost šíření tlakové vlny v kapalině a_s [$m \cdot s^{-2}$]

Rychlost šíření tlakové vlny vypočítáme z délky potrubí l a z doby běhu vlny T .
při uzavření ventilu:

$$a_{su} = \frac{2 \cdot l}{T_u} = \frac{2 \cdot 48}{0,87} = 110,345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (31)$$

při otevření ventilu:

$$a_{so} = \frac{2 \cdot l}{T_o} = \frac{2 \cdot 48}{0,42} = 228,571 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (32)$$

5.3.6 Rychlost proudění kapaliny v [$m \cdot s^{-1}$]

Rychlost proudění kapaliny v za ustáleného stavu v hadici vypočítáme z rovnice kontinuity, kde Q_v je objemový průtok potrubím a S je průřez daného potrubí.

$$Q_v = S \cdot v \Rightarrow v = \frac{Q_v}{S} \quad (33)$$

při uzavřeném ventilu:

$$v_0 = \frac{Q_v}{S} = \frac{4 \cdot Q_v}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0}{\pi \cdot 0,025^2} = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (34)$$

při otevřeném ventilu:

$$v = \frac{Q_v}{S} = \frac{4 \cdot Q_v}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,000981}{\pi \cdot 0,025^2} = 1,998 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (35)$$

5.3.7 Rychlostní difference Δv [$m \cdot s^{-1}$]

Rychlostní difference Δv je rozdíl rychlosti v .

$$\Delta v = v - v_0 = 1,998 - 0 = 1,998 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (36)$$

5.3.8 Zvýšení tlaků Δp [Pa] při hydraulickém rázu pomocí přepočtu Žukovského vztahu na částečný ráz Δp_z [Pa].

Zvýšení tlaku Δp při hydraulickém rázu vypočítáme pomocí Žukovského vztahu
kde $\Delta v = v - v_0$ je rychlostní difference, v je rychlost proudění kapaliny při otevřeném ventilu, v_0 je rychlost proudění při uzavřeném ventilu.

při uzavření ventilu:

$$\Delta p = \rho \cdot a_{su} \cdot \Delta v = 1000 \cdot 110,345 \cdot 1,998 = 220469,31 \text{ Pa} = 0,220 \text{ MPa} \quad (37)$$

při otevření ventilu:

$$\Delta p = \rho \cdot a_{so} \cdot \Delta v = 1000 \cdot 228,571 \cdot 1,998 = 456684,858 \text{ Pa} = 0,457 \text{ MPa} \quad (38)$$

Jelikož Žukovského vztah je definován pouze pro uzavření ventilu a ne pro otevření a také je definován pro otevřenou hladinu a tudíž není zohledněn pro tlakový spád čerpadla, není výpočet přesný.

Při pomalém uzavření a otevření ventilu je doba větší, než doba běhu vlny při uzavření a otevření. Jedná se tedy o částečný hydraulický ráz a Žukovského vztah je nutno přepočítat.

5.3.9 Přepočet zvýšení tlaku při částečném hydraulickém rázu Δp_{ξ} [MPa]

Přepočet Žukovského vztahu na částečný ráz Δp_{ξ} kde T_B je doba běhu vlny, T_u je dobu uzavření ventilu a T_o je doba otevření ventilu.

při uzavření ventilu:

$$\Delta p_{\xi} = \Delta p \cdot \frac{T_u}{T_B} = 220469,31 \cdot \frac{0,87}{2,563} = 74837,311 \text{ Pa} = 0,074 \text{ MPa} \quad (39)$$

při otevření ventilu:

$$\Delta p_{\xi} = \Delta p \cdot \frac{T_o}{T_B} = 456684,858 \cdot \frac{0,42}{2,384} = 80456,225 \text{ Pa} = 0,805 \text{ MPa} \quad (40)$$

5.3.10 Modul pružnosti kapaliny K [I]

Modul pružnosti je dán vztahem:

při uzavření ventilu:

$$K = \rho \cdot a_{su}^2 = 1000 \cdot 110,345^2 = 121746019,03 \text{ Pa} \quad (41)$$

při otevření ventilu:

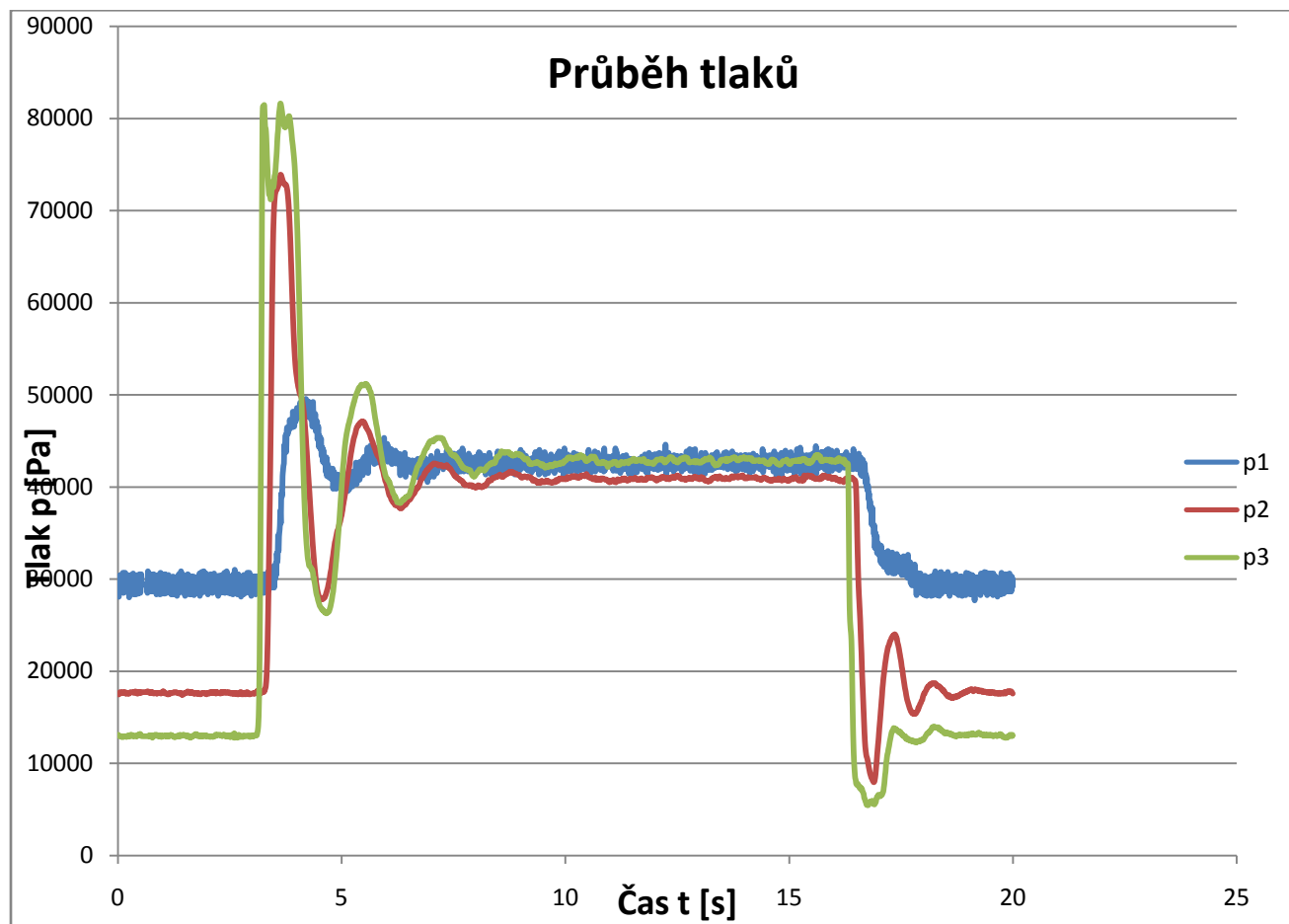
$$K = \rho \cdot a_{so}^2 = 1000 \cdot 228,571^2 = 52244702,04 \text{ Pa} \quad (42)$$

5.4 Porovnání vypočtených hodnot

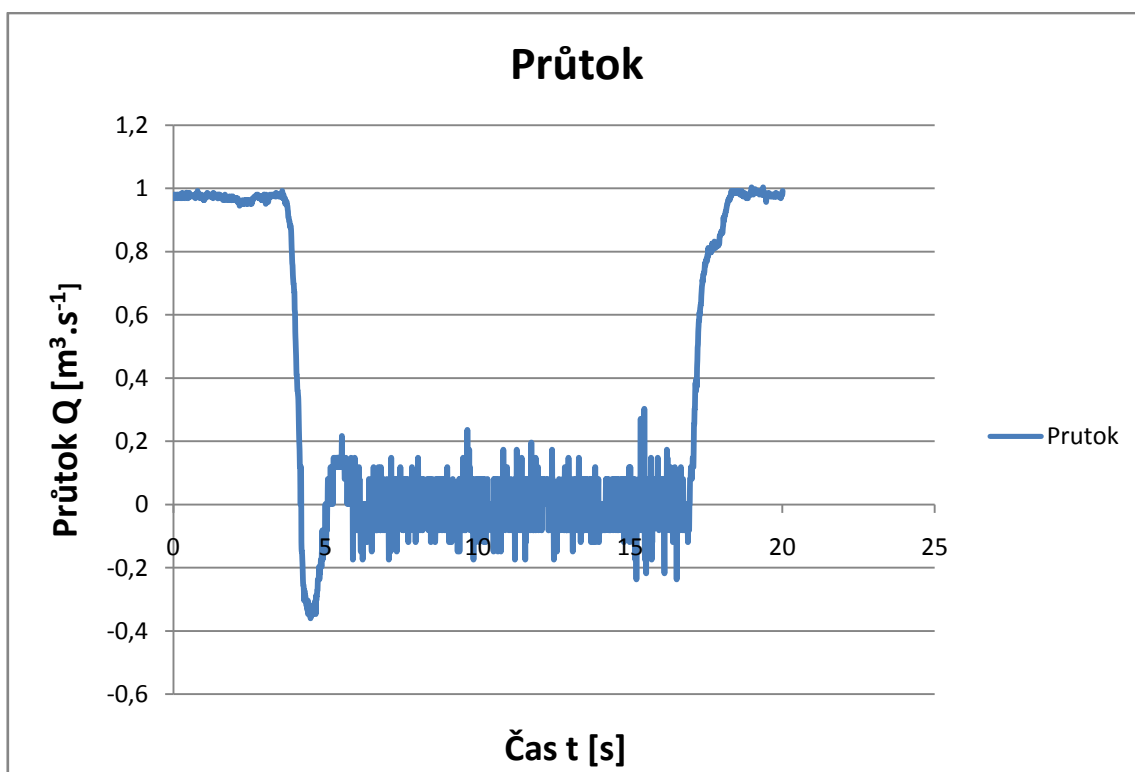
Z vypočtených hodnot můžu usoudit, že rychlost uzavírání ventilu má malý vliv na rychlost šíření tlakové vlny a_s , ale podstatně ovlivní modul pružnosti kapaliny při otevírání ventilu a to při pomalém otevření naroste o $\Delta K = 9564035,04 \text{ Pa}$. Zvýšení tlaku Δp při hydraulickém rázu vypočítané pomocí Žukovského vztahu, není definováno pro otevření ventilu a také není zohledněn pro tlakový spád čerpadla. Tyto vypočtené hodnoty tlaku jsou pouze orientační i v případě přepočtu na částečný hydraulický ráz.

5.5 Grafické zpracování výsledků

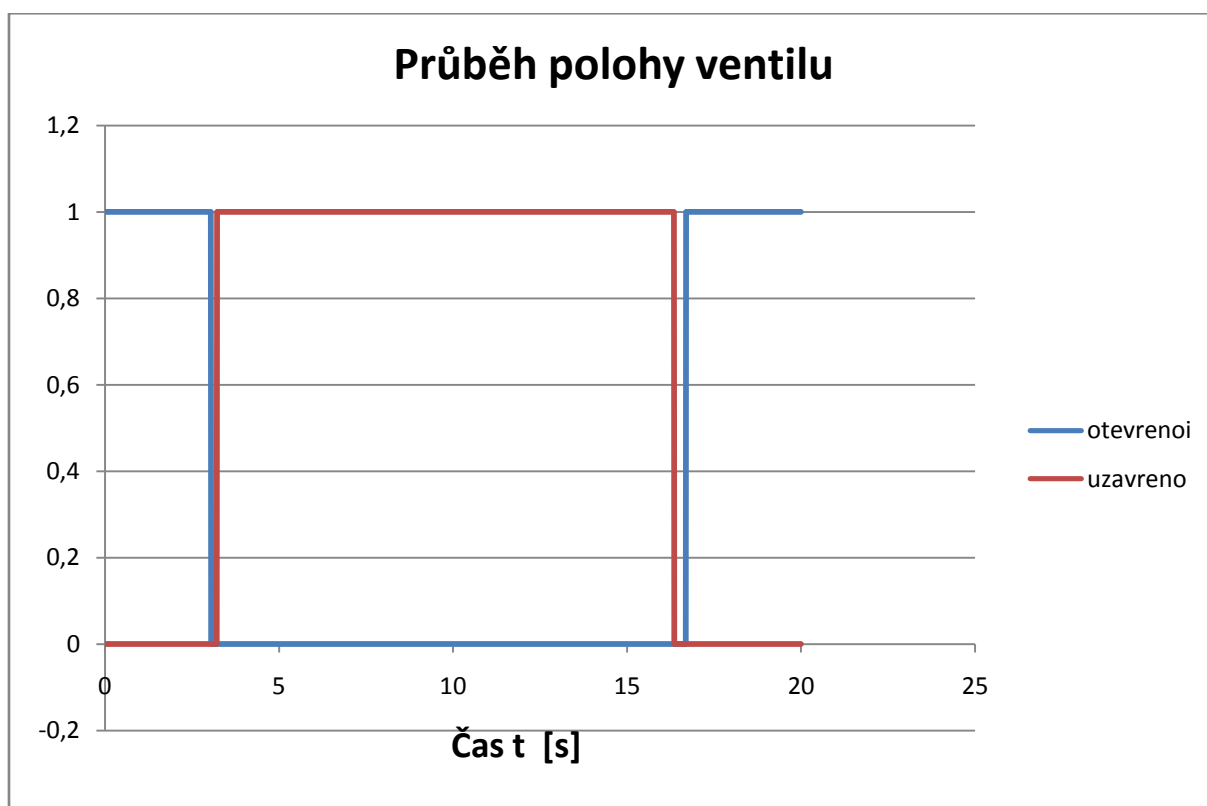
5.5.1 Grafické zpracování hydraulického rázu při rychlém uzavření ventilu



graf 5.1 Průběh tlaků při rychlém uzavření ventilu (vlastní tvorba)

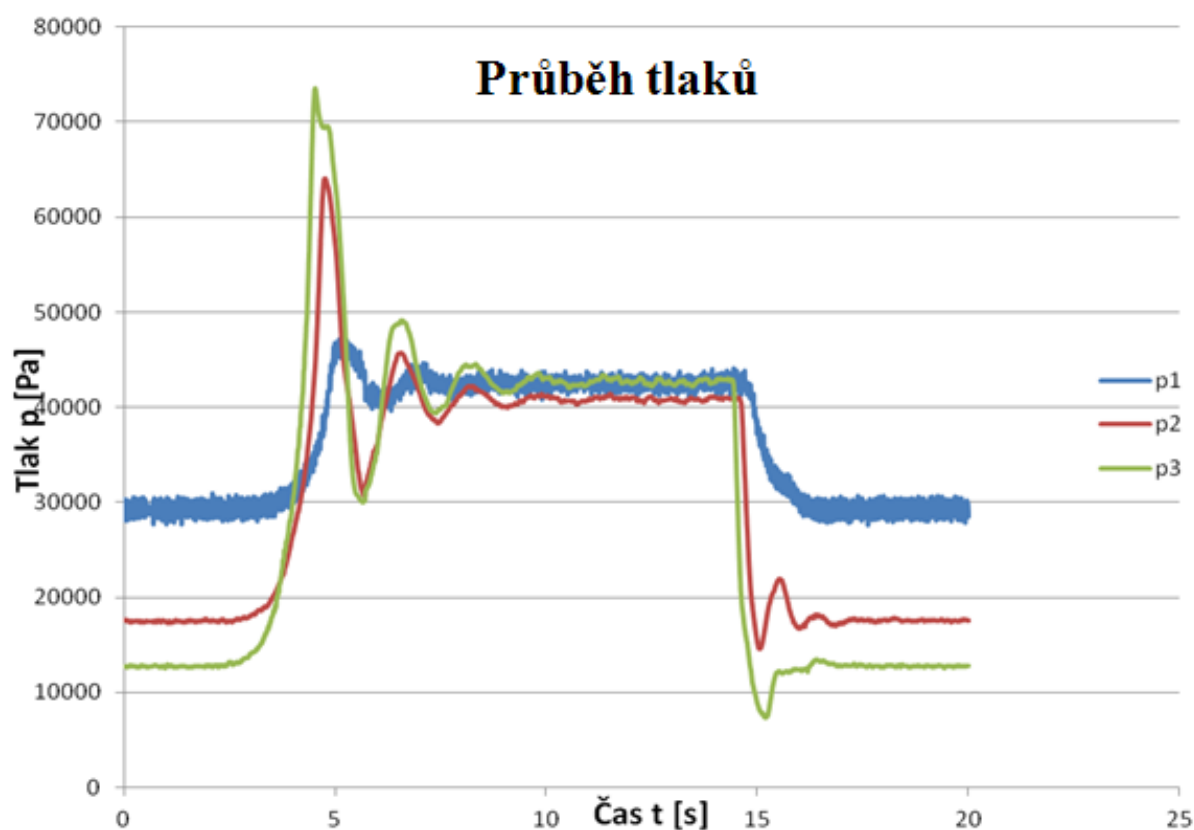


graf 5.2 Průběh průtoku při rychlém uzavření ventilu (vlastní tvorba)

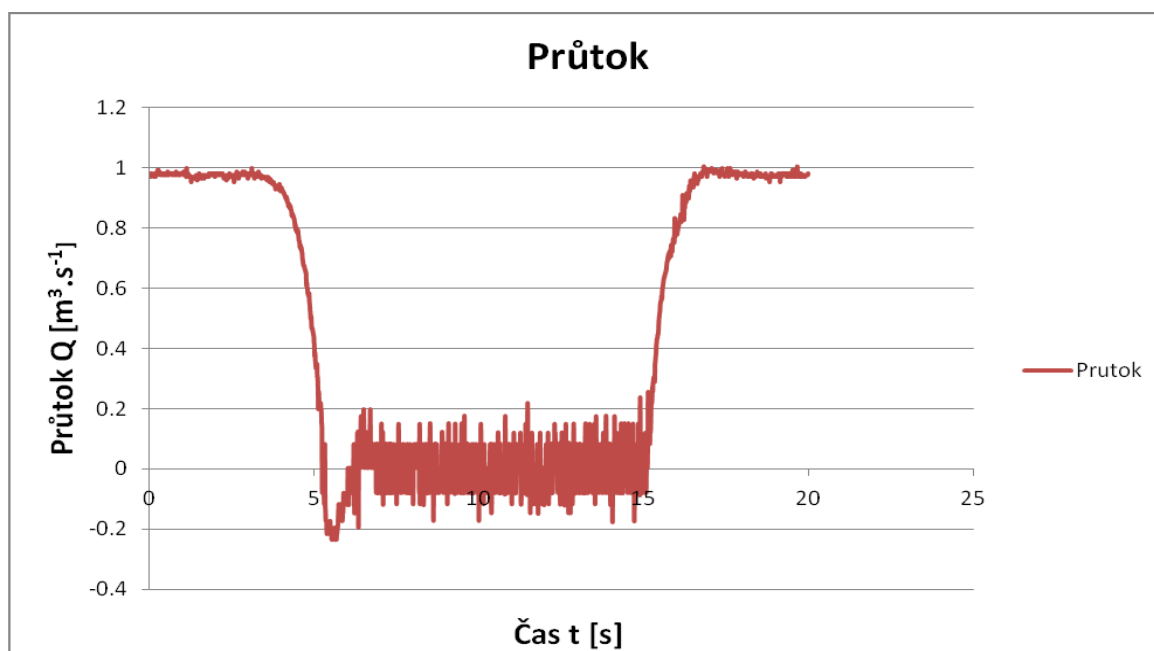


graf 5.3 Průběh polohy ventilu při rychlém uzavření ventilu (vlastní tvorba)

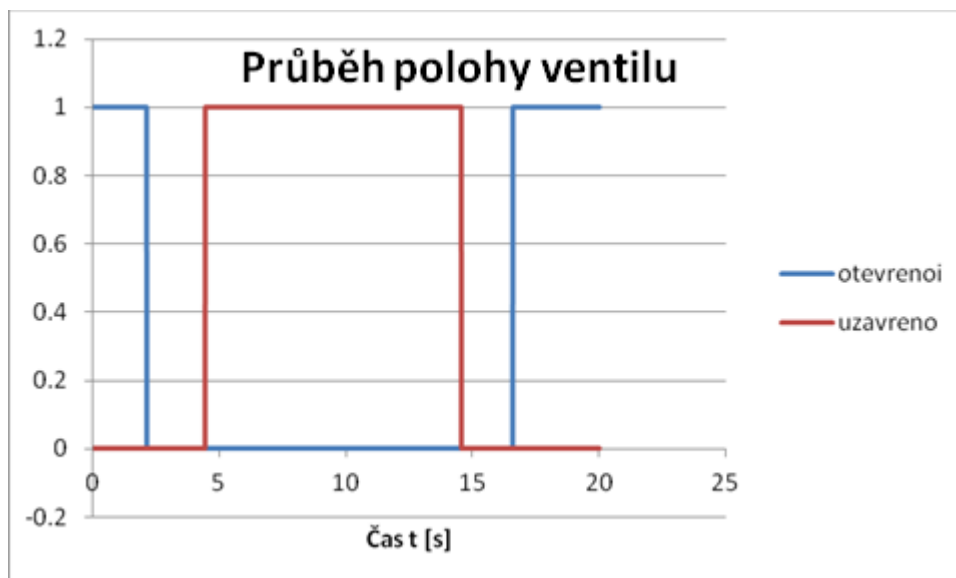
5.5.2 Grafické zpracování hydraulického rázu při pomalém uzavření ventilu



graf 5.4 Průběh tlaků při pomalém uzavření ventilu (vlastní tvorba)



graf 5.5 Průběh průtoku při pomalém uzavření ventilu (vlastní tvorba)



graf 5.6 Průběh polohy ventilu při pomalém uzavření ventilu (vlastní tvorba)

5.6 Porovnání grafů

Z grafů je patrné, že při rychlém uzavření ventilu narůstá tlak podstatně větších hodnot než při pomalém uzavření a to o hodnotu $\Delta p_3 = 10417$ Pa. Průtok při rychlé uzavření klesá do záporných hodnot více než při pomalém uzavření a to o hodnotu $\Delta Q = 0,115 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

6. Závěr

Teoretickou část práce jsem věnoval popisu měřících přístrojů vhodných pro měření hydraulický ráz. Pozornost jsem věnoval měřidlům, které jsou v obvodě zapojené (měří dynamické veličiny), nebo měřidlům, které se nacházejí na katedře.

Experimentální části práce jsem popsal obvod pro hydraulický ráz. Jedním z cílů této bakalářské práce bylo připojit a nastavit diferenční manometr ST 3000, aby bylo možné měřit průtoky i do záporných hodnot. Docílil jsem toho v nastavení diferenčního manometru, kde jsem nastavil vhodně snímané rozsahy tlaků. Program dříve vytvořený pomocí softwaru Matlab Simulink bylo nutné upravit. Nejdůležitější úprava se týkala konstanty vyrovnávající vstupní signál, tuto konstantu jsem vypočetl pomocí rozsahu manometru. Několika sadami měření jsem si ověřil, že nastavení je vhodné pro daný úkol. Po nastavení diferenčního manometru ST 3000 a vyladění tlakových snímačů p_1 , p_2 , p_3 , je obvod připraven na samotné měření.

Naměřené hodnoty v Matlab Simulink jsem převedl do programu Microsoft Excel a dále zpracoval. Na jednom z grafů jsem názorně popsal děje při hydraulickém rázu. Z porovnání grafů je zřejmé, že rychlost uzavření ventilu má velký vliv na nárůst tlaku v obvodu. Vypočtené hodnoty jsou zavádějící, jelikož Žukovského vztah není definován pro záporné hodnoty průtoku, a proto tyto hodnoty mohou být pouze orientační.

Tato práce může být použita jako vzor pro návod na laboratorní měření hydraulického rázu.

7. Seznam použité literatury

- [1] Noskievič, J. Janalík, J. Rýc, Z. Šťáva, P.: Mechanika tekutin – návod pro laboratorní cvičení. Skripta Vysoká škola báňská – Technická universita Ostrava, 1987. 153 s.
- [2] Bojko, M. Kozubková, M. Rautová, J.: Základy hydromechaniky a zásobování hasiv. Skripta Vysoká škola báňská – Technická universita Ostrava, 2007. 182 s. ISBN: 80-86634-53-1
- [4] Mamica, M.: Měření dynamického průtoku při hydraulickém rázu na vodní trati. Bakalářská práce Vysoká škola báňská – Technická universita Ostrava, 2010. 69 s.
- [5] Janalík, J.: Měření tekutinových mechanismů, VŠB-TU Ostrava, 1995. 129 s.
- [6] Drábková, S., Kozubková, M.: Cvičení z mechaniky tekutin, VŠB-TU Ostrava, 2002. 145 s.
- [7] Kozubková, M.: Sylabus - Dynamika, VŠB-TU Ostrava, 2005. 100 s.
- [8] Průtokoměry – přístroje pro měření průtoku [online] 6. říjen 2010, dostupné z:
<http://www.omegaeng.cz/>
- [9] Měřidla průtoku [online] 11. listopad 2010, dostupné z:
<http://cs.wikipedia.org>
- [10] ORLÍKOVÁ, S. *Měření průtoku tekutin – principy průtokoměru* [online] 23. leden 2012
Ústav automatizace, měření a kybernetiky VUT BRNO dostupný z www: \leq
http://www.elektrorevue.cz/clanky/01049/#_Zpusoby_mereni_prutoku_>
- [11] *Měření průtoku a protékého množství* [online] 23. leden 2012 dostupný z www: \leq
<http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F4/F4k45-prut.htm> \geq .
- [12] Babejová, S.: Měření hydraulických veličin při neustáleném proudění stlačitelné kapaliny. Bakalářská práce Vysoká škola báňská – Technická universita Ostrava, 2008. 52 s.

[13] Aplikace SCT 3000 Smartline Configuration Toolkit [online] 26. únor 2012 dostupné z www:
<http://hpsweb.honeywell.com/Cultures/enUS/Products/Instrumentation/pressure/SCT/SoftwareDownloads/documents.htm>

[14] Regulus cirkulační čerpadlo WILO RS 25/4 230 V PN 10 Technická dokumentace. [online] 26. únor 2012 dostupné z:
<http://www.regulus.cz/uvod.html>

Seznam obrázků

obr. 2.1 Elektrický snímač tlaku (vlastní tvorba)	11
obr. 2.2 Diferenční manometr ST 3000 (vlastní tvorba)	12
obr. 2.3 Řez clonou [5]	13
obr. 2.4 Ultrazvukový průtokoměr (vlastní tvorba)	15
obr. 2.5 Indukční průtokoměr [2]	15
obr. 3.1 Hydraulický obvod (vlastní tvorba)	16
obr. 3.2 Schéma obvodu [4]	17
obr. 3.3 Nádrž N (vlastní tvorba)	17
obr. 3.4 Čerpadlo HG (vlastní tvorba)	18
obr. 3.5 Snímače tlaku $p_1 - p_2 - p_3$ (vlastní tvorba)	18
obr. 3.6 Uzavírací ventil V (vlastní tvorba)	19
obr. 3.7 Clona C (vlastní tvorba)	19
obr. 3.8 Hadice H (vlastní tvorba)	20
obr. 3.9 Diferenciální manometr DM (vlastní tvorba)	21
obr. 3.10 Ultrazvukový průtokoměr P (vlastní tvorba)	21
obr. 4.1 Pěticečná ventilová souprava (vlastní tvorba)	22
obr. 4.2 Připojení odvětrávací soustavy	23
obr. 4.3 Blokové schéma (vlastní tvorba)	25
obr. 4.4 Nastavení diferenčního manometru do záporných hodnot (vlastní tvorba)	27
obr. 5.1 Rozbor grafu při hydraulickém rázu (vlastní tvorba)	28
obr. 5.2 Průběh polohy ventilu (vlastní tvorba)	29
obr. 5.3 Perioda vlny při rychlém uzavření ventilu (vlastní tvorba)	30
obr. 5.4 Průběh polohy ventilu (vlastní tvorba)	32
obr. 5.5 Perioda vlny při pomalém uzavření ventilu (vlastní tvorba)	33

Seznam grafů

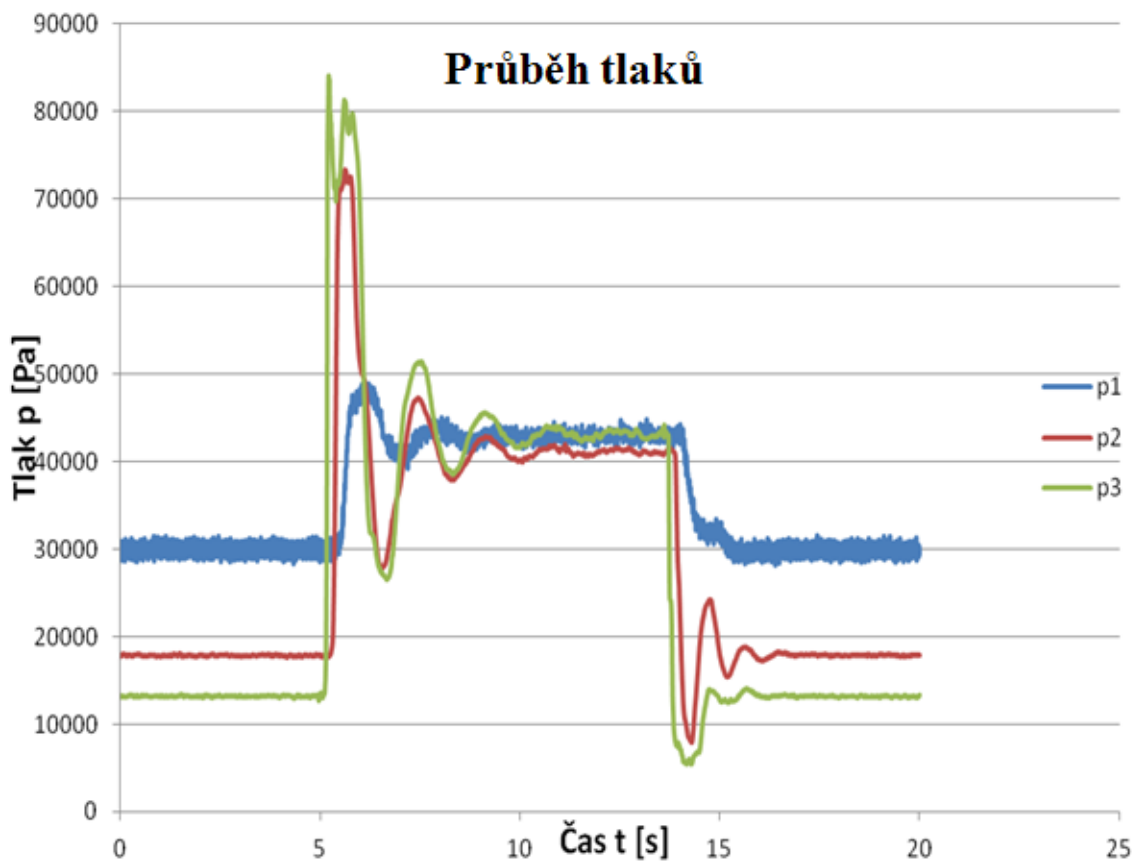
graf 2.1 křivka clony (vlastní tvorba)	14
graf 5.1 Průběh tlaků při rychlém uzavření ventilu (vlastní tvorba)	36
graf 5.2 Průběh průtoku při rychlém uzavření ventilu (vlastní tvorba)	37
graf 5.3 Průběh polohy ventilu při rychlém uzavření ventilu (vlastní tvorba)	37
graf 5.4 Průběh tlaků při pomalém uzavření ventilu (vlastní tvorba)	38
graf 5.5 Průběh průtoku při pomalém uzavření ventilu (vlastní tvorba)	38
graf 5.6 Průběh polohy ventilu při pomalém uzavření ventilu (vlastní tvorba)	39

8. Seznam příloh

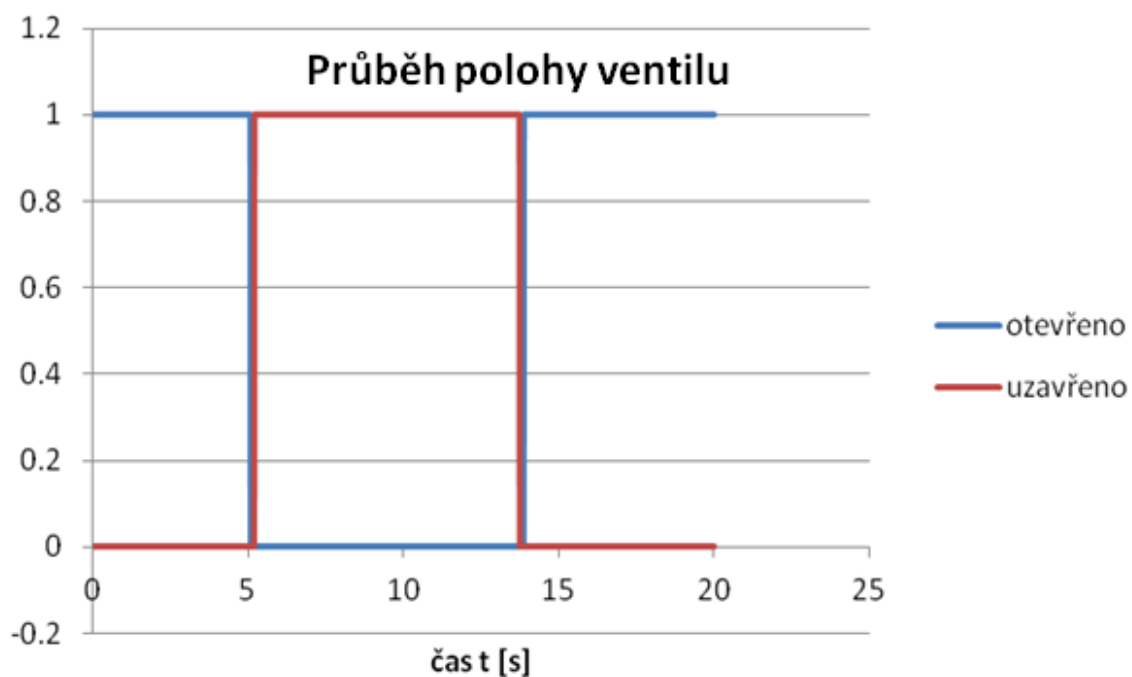
Příloha 1: Grafické zpracování výsledků.....	43
Příloha 2: Ukázka naměřených dat z Matlabu.....	49
Příloha 3: Parametry čerpadla Wilo.....	50

Přílohy

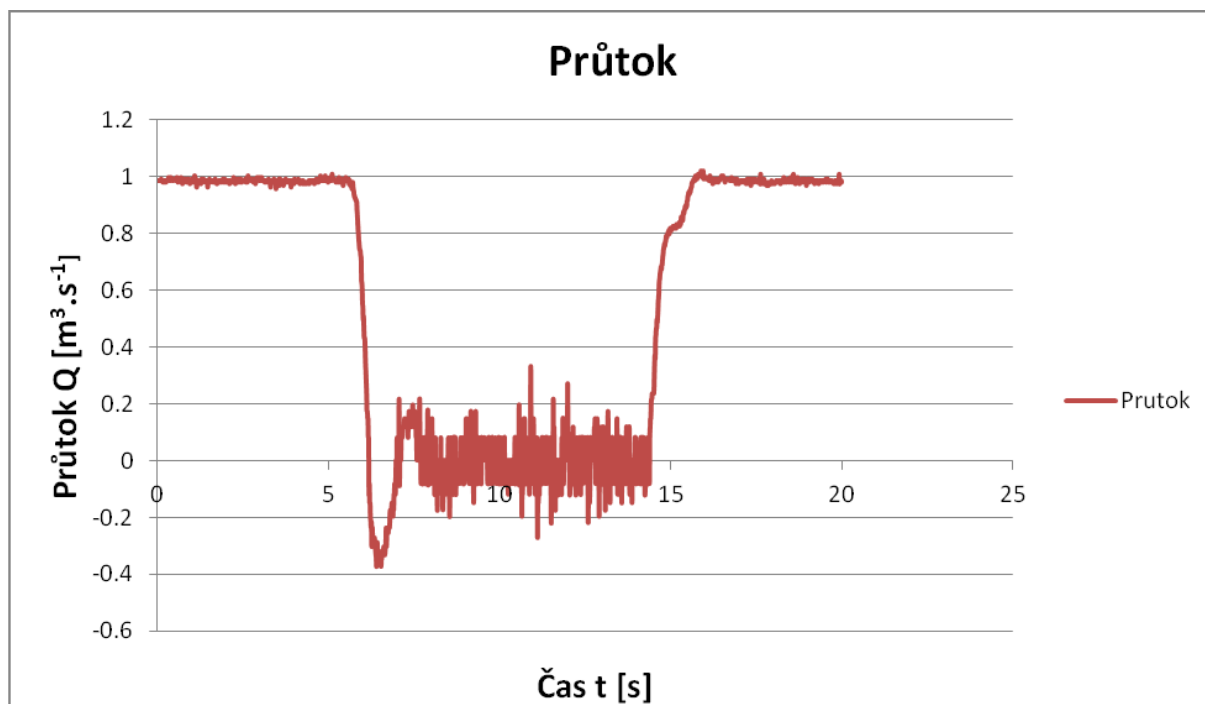
Příloha 1: Grafické zpracování výsledků



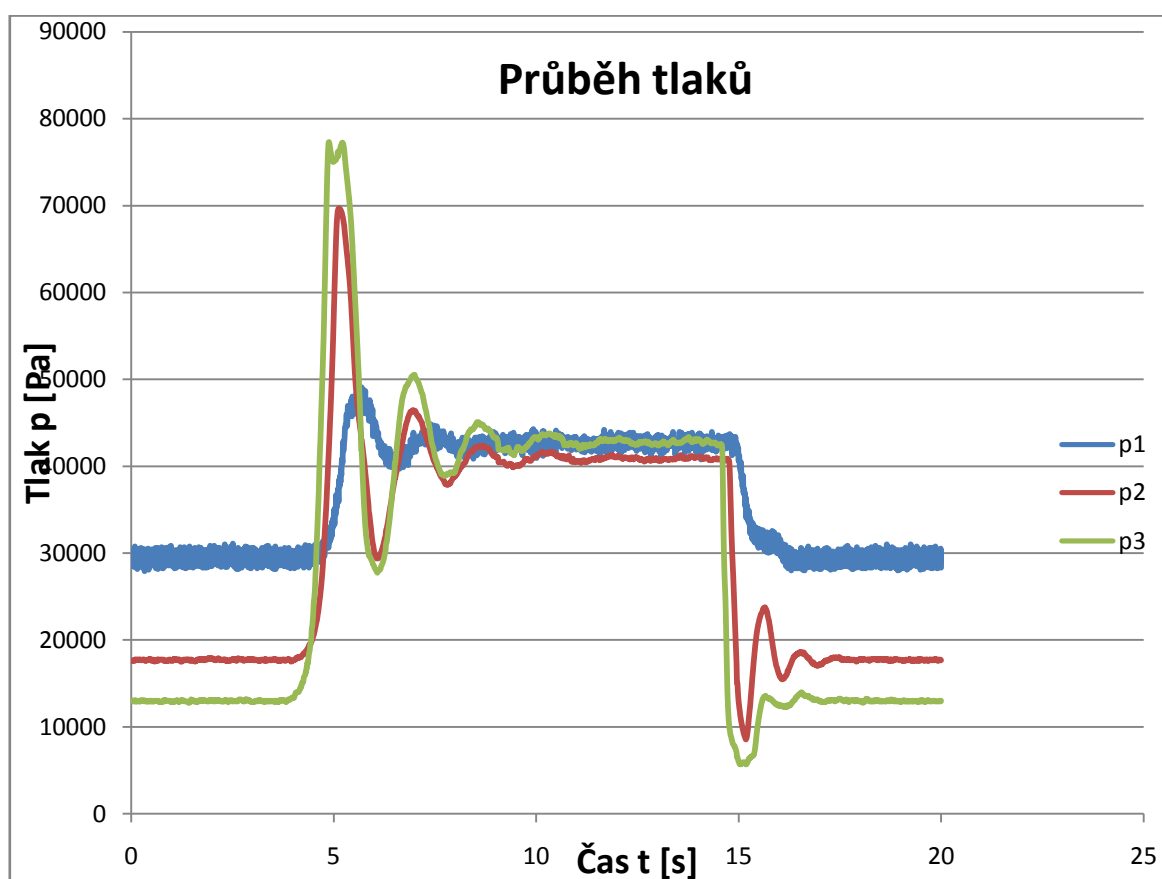
P. 1 Průběh tlaků při rychlém uzavření ventilu (vlastní tvorba)



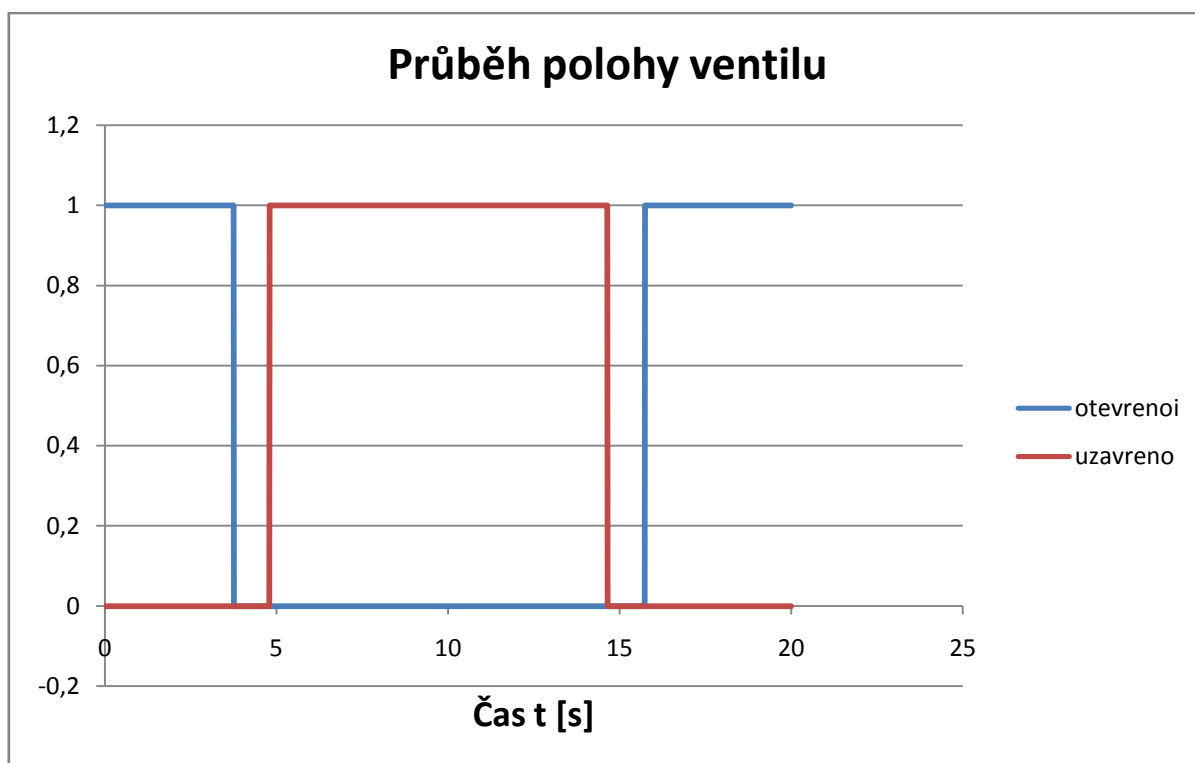
P. 2 Průběh polohy ventilu při rychlém uzavření ventilu (vlastní tvorba)



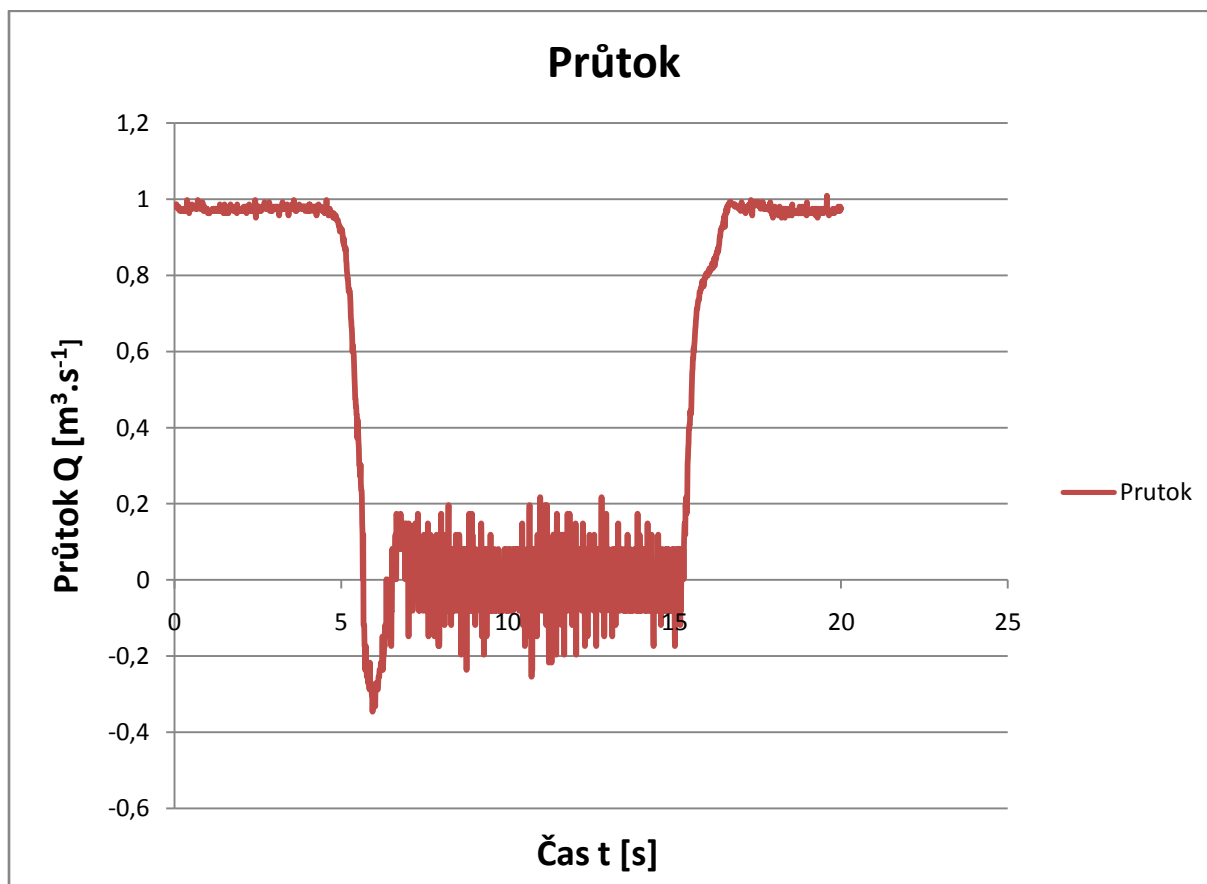
P. 3 Průběh průtoku při rychlém uzavření ventilu (vlastní tvorba)



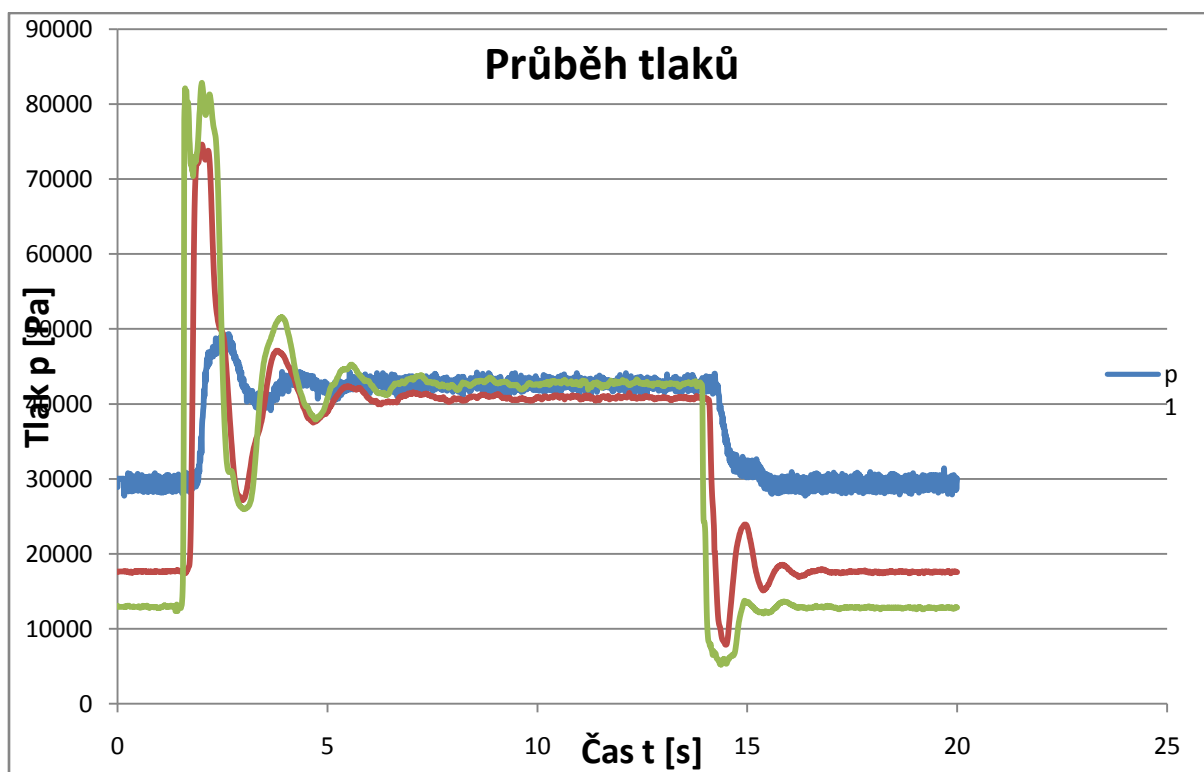
P. 4 Průběh tlaků při pomalém uzavření ventilu (vlastní tvorba)



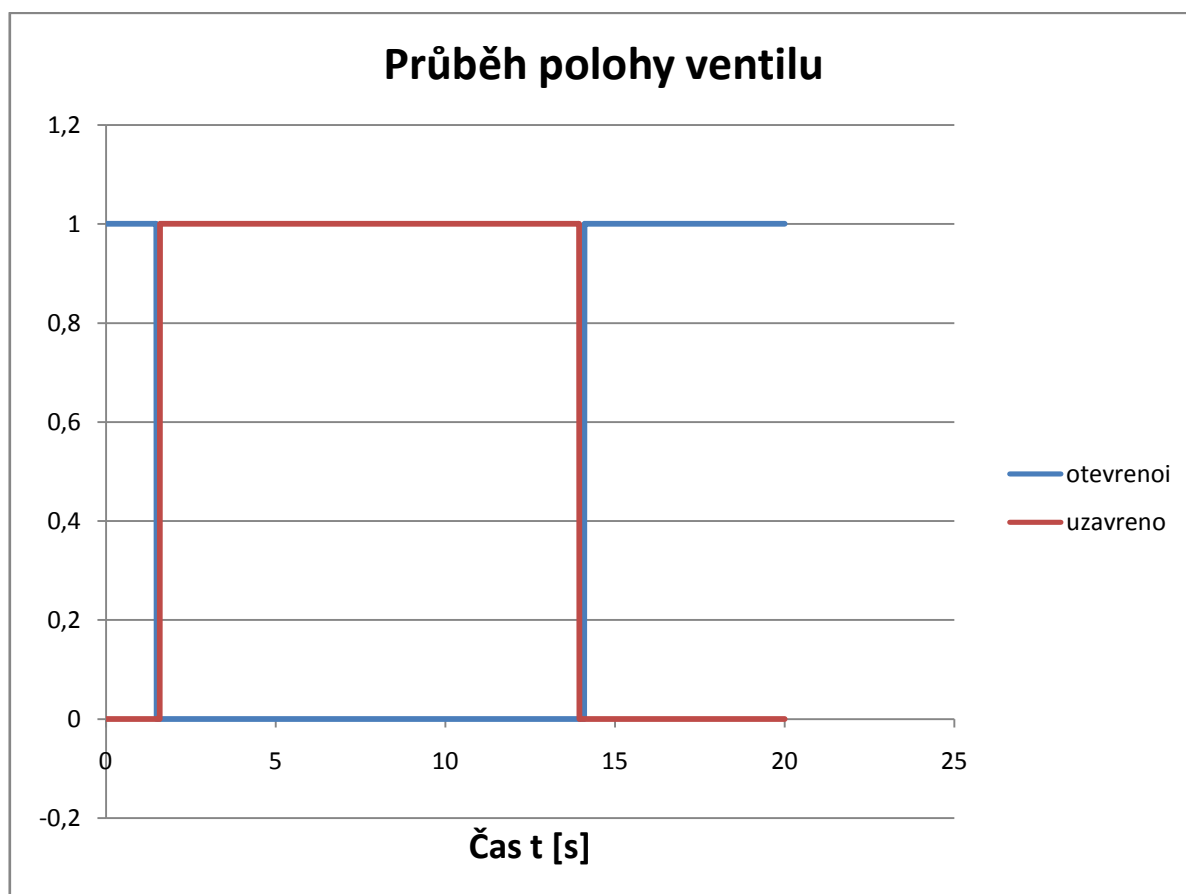
P. 5 Průběh polohy ventilu při pomalém uzavření ventilu (vlastní tvorba)



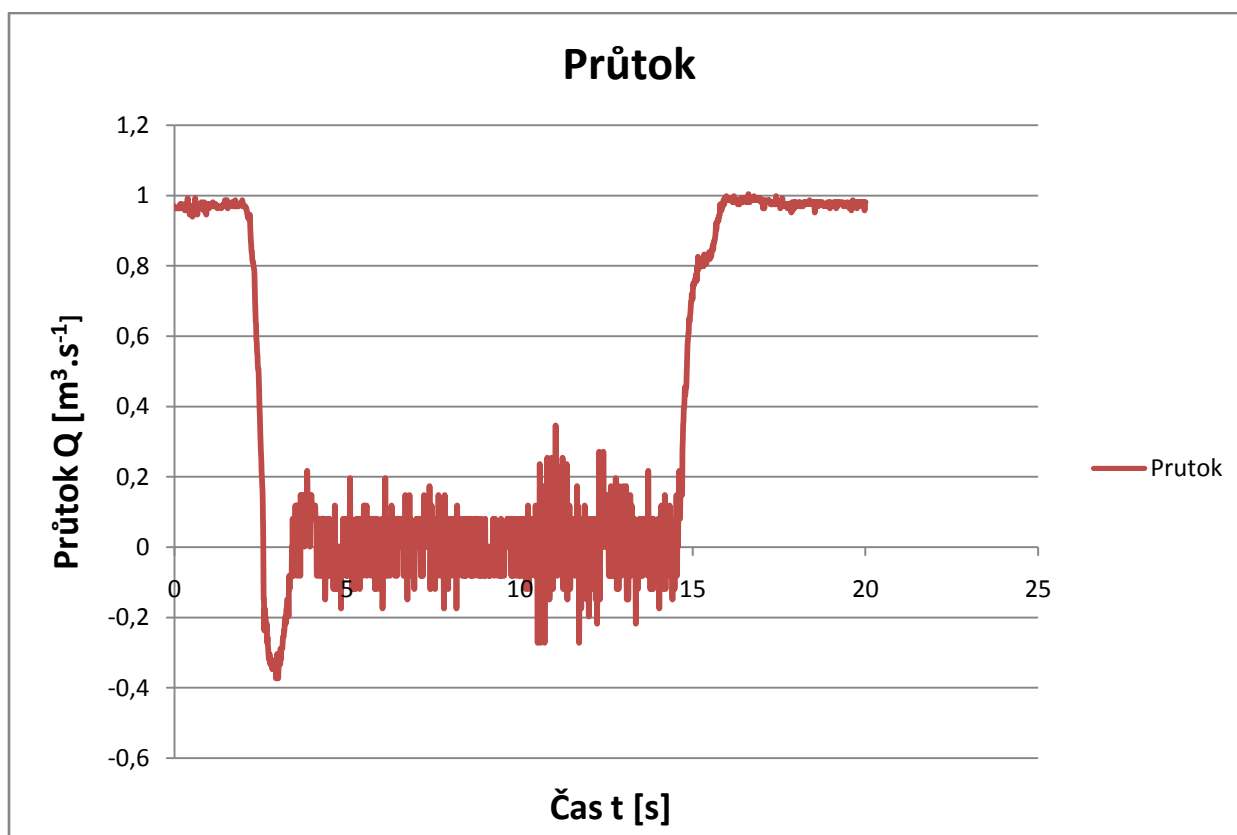
P. 6 Průběh průtoku při pomalém uzavření ventilu (vlastní tvorba)



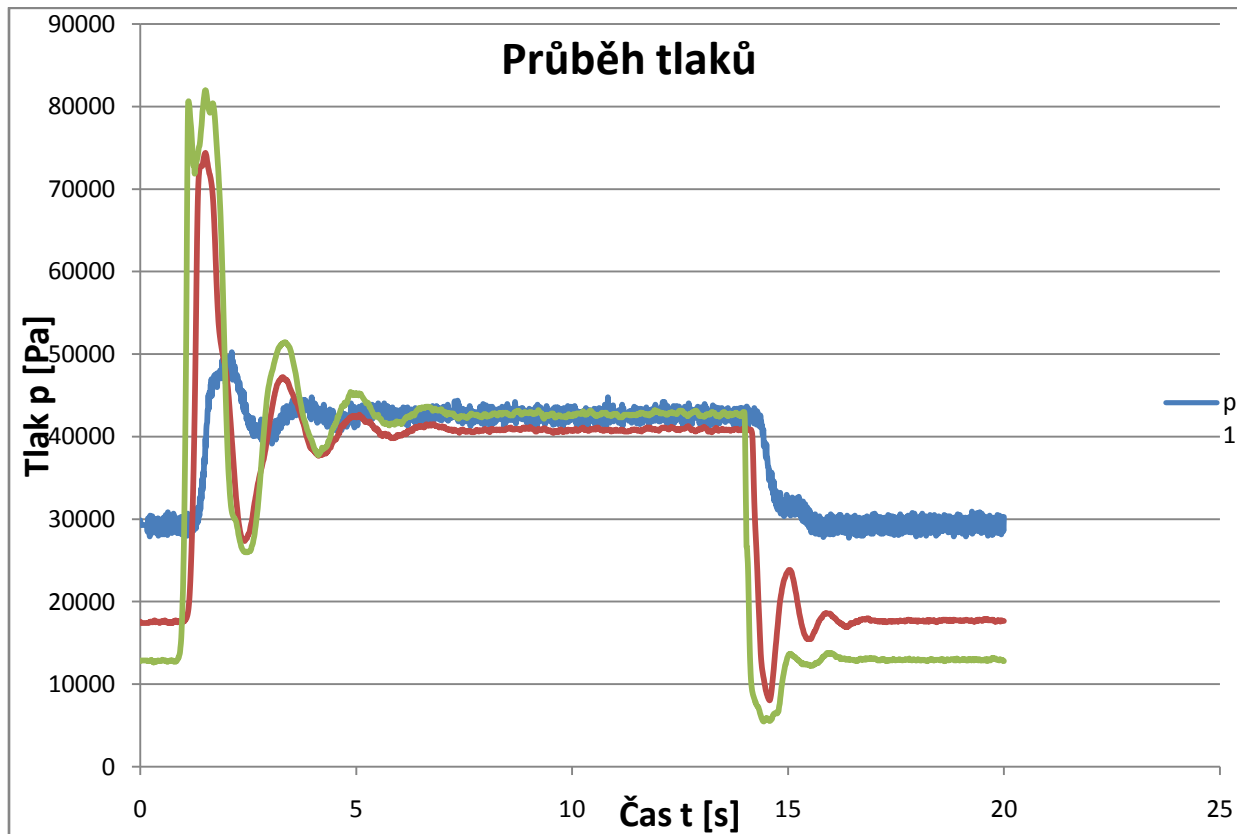
P. 7 Průběh tlaků při rychlém uzavření ventilu (vlastní tvorba)



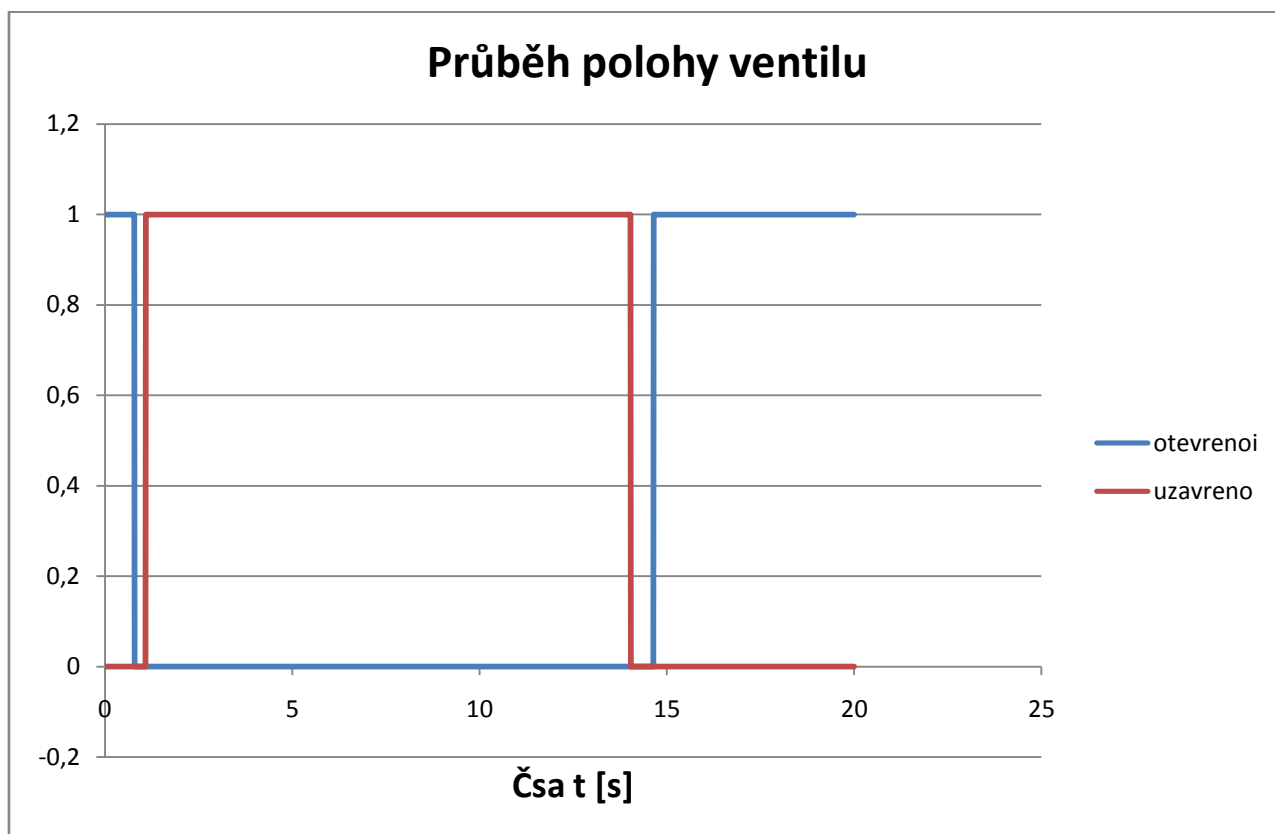
P. 8 Průběh polohy ventilu při rychlém uzavření ventilu (vlastní tvorba)



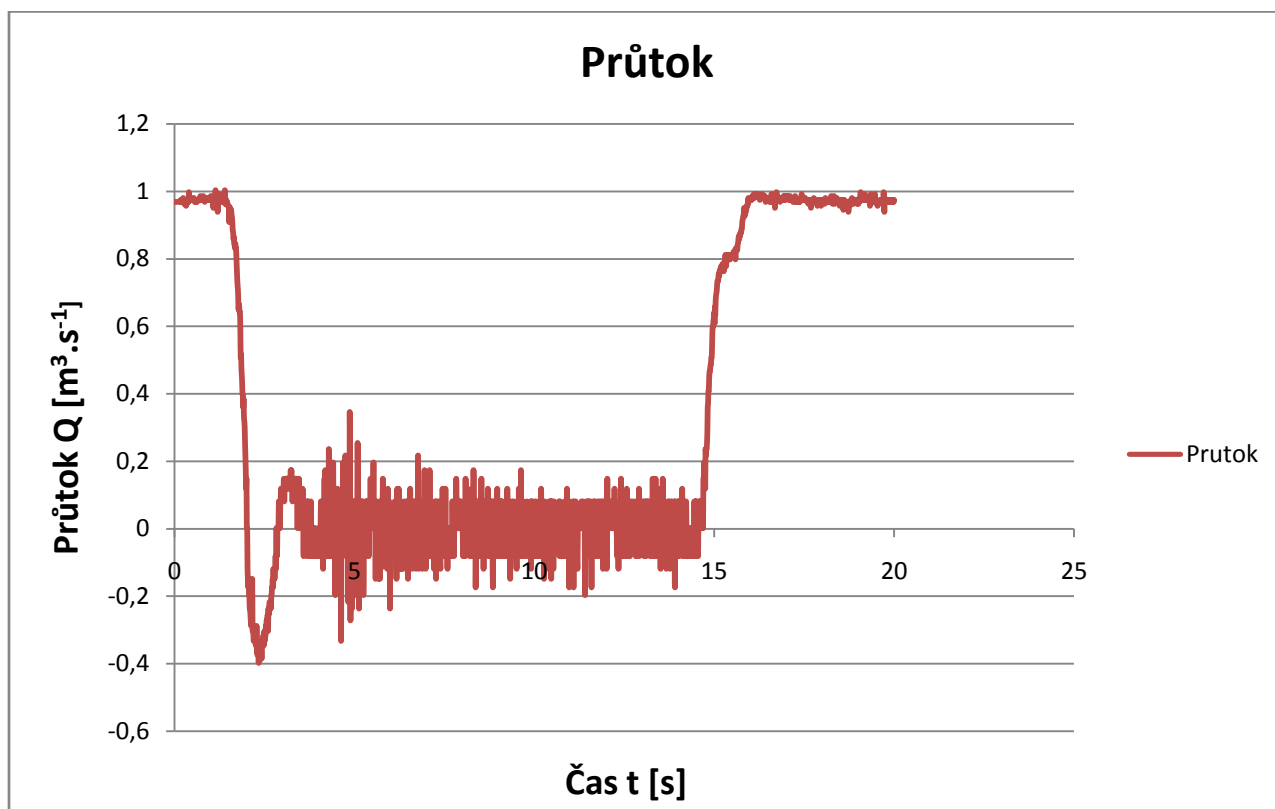
P. 9 Průběh průtoku při rychlém uzavření ventilu (vlastní tvorba)



P. 10 Průběh tlaků při rychlém uzavření ventilu (vlastní tvorba)



P. 11 Průběh polohy ventilu při rychlém uzavření ventilu (vlastní tvorba)



P. 12 Průběh průtoku při rychlém uzavření ventilu (vlastní tvorba)

Příloha 2: Ukázka naměřených dat z Matlabu

t [s]	Q [m ³ .s ⁻¹]	p ₁	p ₂	p ₃	o	z
0	0,96904	29867	17578	12777	1	0
0,01	0,96904	29297	17415	12858	1	0
0,02	0,96904	29297	17415	12858	1	0
0,03	0,96904	29297	17415	12858	1	0
0,04	0,96904	29297	17415	12858	1	0
0,05	0,96904	29297	17415	12858	1	0
0,06	0,96904	29297	17415	12858	1	0
0,07	0,96904	29297	17415	12858	1	0
0,08	0,96904	29297	17415	12858	1	0
0,09	0,96904	29297	17415	12858	1	0
0,1	0,96904	29297	17415	12858	1	0
0,11	0,96904	29297	17415	12858	1	0
0,12	0,96904	29297	17415	12858	1	0
0,13	0,96904	29297	17415	12858	1	0
0,14	0,96904	29297	17415	12858	1	0
0,15	0,96904	29297	17415	12858	1	0
0,16	0,96904	29297	17415	12858	1	0
0,17	0,97488	28483	17415	12777	1	0
0,18	0,96904	30111	17415	12777	1	0
0,19	0,97488	28483	17415	12777	1	0

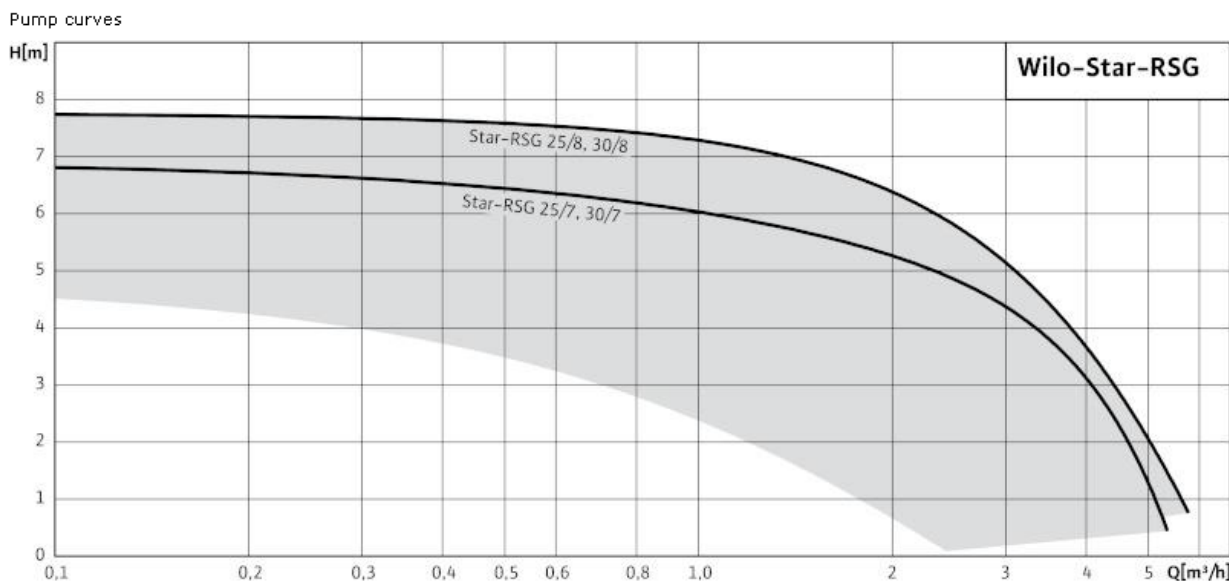
Příloha 3: Parametry čerpadla Wilo

Bezúdržbové, mokroběžné cirkulační čerpadlo pro montáž do potrubí s manuálním 3-stupňovým přepínáním otáček. Motor odolný proudy při zablokování rotoru. Těleso z šedé litiny, oběžné kolo z plastické hmoty zesílené skleněnými vlákny, hřídel z chromové oceli s grafitovými kluznými ložisky [14].

Technické parametry:

- Čerpané médium: užitková voda
- Provozní teplota: 20 - 100 °C
- Okolní teplota (max): 40°C
- Provozní max: 10 bar
- Druh napájení: 1~230V/50Hz
- Příkon: 27-32/40-48/56-68 W
- Otáčky: 1200/1650/2000 ot/min
- Potrubní přípojka - šroubení: G 1 1/2" (6/4")

H-Q charakteristika čerpadla



P. 13 H-Q charakteristika čerpadla [14]